2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

Artículos

Instrumentación hidráulica y su aplicación a las ecuaciones de Nikuradse y Prandtl-Von Kármán, para la estimación de la rugosidad compuesta en túneles de desvío. Caso de estudio: río Grijalva

Hydraulic instrumentation and its application to the Nikuradse and Prandtl-Von Kármán, equations for the estimation of composite roughness in diversion tunnels Case study: Grijalva River

Ana Alicia Palacios-Fonseca[1], ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9860-8345

Humberto Marengo-Mogollón[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8829-4020

[1]Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Jiutepec, Morelos, México, ana_palacios@tlaloc.imta.mx

[2]Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, hmarengom@gmail.com

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Autora para correspondencia: Ana Alicia Palacios-Fonseca, ana_palacios@tlaloc.imta.mx, anapalf27@gmail.com

Resumen

En los recientes proyectos hidroeléctricos construidos en México (P.H. El Cajón, P.H. La Yesca y túneles del río Grijalva) se han diseñado las obras de desvío con una combinación de materiales: concreto hidráulico en su plantilla y concreto lanzado en sus paredes y bóveda, lo que permite reducir las pérdidas hidráulicas y obtener una mayor capacidad de descarga para garantizar la seguridad hidrológica de la presa durante el tiempo de construcción, además de lograr considerables ahorros en los costos. Para monitorear dicha capacidad se han realizado diversos proyectos de instrumentación, lo que permite registrar las variables hidráulicas en diferentes secciones, además de estimar el parámetro representativo de la rugosidad compuesta.

Este artículo trata sobre la estimación del parámetro de rugosidad compuesta en túneles de desvío con caso de estudio: "túneles de comunicación del río Grijalva", localizados aguas arriba de la Central Hidroeléctrica Peñitas, utilizando instrumentación hidráulica que permite medir, entre otras variables, la velocidad en la zona cercana a la pared. Y aplicando las teorías de capa límite de Nikuradse y de Prandtl-Von Kármán determinar la rugosidad equivalente en las paredes, así como la

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

revisión de 17 ecuaciones empíricas para obtener finalmente la rugosidad compuesta representativa de los túneles.

Palabras clave: instrumentación hidráulica, rugosidad compuesta, túneles de desvío, perfiles de velocidad, Nikuradse, Prandtl-Von Kármán, capa límite, flujo a superficie libre, seguridad de presas.

Abstract

In the recent hydroelectric power plants built in Mexico (P.H. El Cajón, P.H. La Yesca, and Grijalva River tunnels), the diversion tunnels have been designed with a combination of materials: hydraulic concrete in its template and concrete cast in its walls and vault, which allows to reduce hydraulic losses and get a greater discharge capacity to guarantee the hydrological safety of the dam during the build time, in addition to achieving considerable cost savings. To monitor this capacity, several instrumentation projects have been carried out, recording the hydraulic variables in different sections, in addition to estimating the representative parameter of the composite roughness.

This article relates how estimates the composite roughness parameter in diversion tunnels, in a case study: "Communication tunnels of the Grijalva River", upstream of the Penitas Hydroelectric Power Plant, using hydraulic instrumentation to measure, among other variables, the speed in the area near to the wall. And applying the boundary layer theories of Nikuradse and Prandtl-Von Kármán to determine the

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

equivalent roughness in the walls, as well as the review of 17 empirical equations to finally obtain the representative composite roughness of the tunnels.

Keywords: Hydraulic instrumentation, composite roughness, diversion tunnels, velocity profiles, Nikuradse, Prandtl-Von Kármán, boundary layer, free-surface flow, dam safety.

Recibido: 04/03/2020

Aceptado: 01/03/2021

Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), a través de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (CPH) y del Laboratorio de Hidráulica, ha llevado a cabo desde 2008 diversos proyectos de instrumentación hidráulica, en el P.H. El Cajón, P.H. La Yesca y los túneles del río Grijalva. En el P.H. La Yesca se instrumentaron diversas estructuras para estudiar su comportamiento hidráulico: las obras de desvío; la obra de generación, el

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

desfogue y la cámara de oscilación; la obra de excedencias; el vertedor; el río aguas abajo de la presa, y el embalse. Dichas instrumentaciones consisten principalmente en la instalación de celdas o sensores de presión, y medidores *doppler* para calcular la velocidad y el gasto, así como otras variables, para el estudio de la rugosidad compuesta.

En 2007, como resultado de las lluvias acumuladas del 28 de octubre al 3 de noviembre de 2007 sobre el río Grijalva en Chiapas y que arrojó 1 077 mm, se produjo un deslizamiento por margen derecha de tierra y roca de 55 millones de metros cúbicos, lo que provocó un bloqueo en el río de 800 m de longitud y 300 m de ancho, representando principalmente un serio riesgo para la seguridad de la C.H. Peñitas en caso de un rompimiento que podría generar una avenida no regulada y, por lo tanto, graves daños a las poblaciones aguas abajo (Marengo, 2011). Asimismo, después del deslizamiento de tierra, la conexión entre los embalses aguas arriba del caído y el de la presa Peñitas quedó reducida a un canal de 930 m de longitud y ancho de 70 m (Figura 1).

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

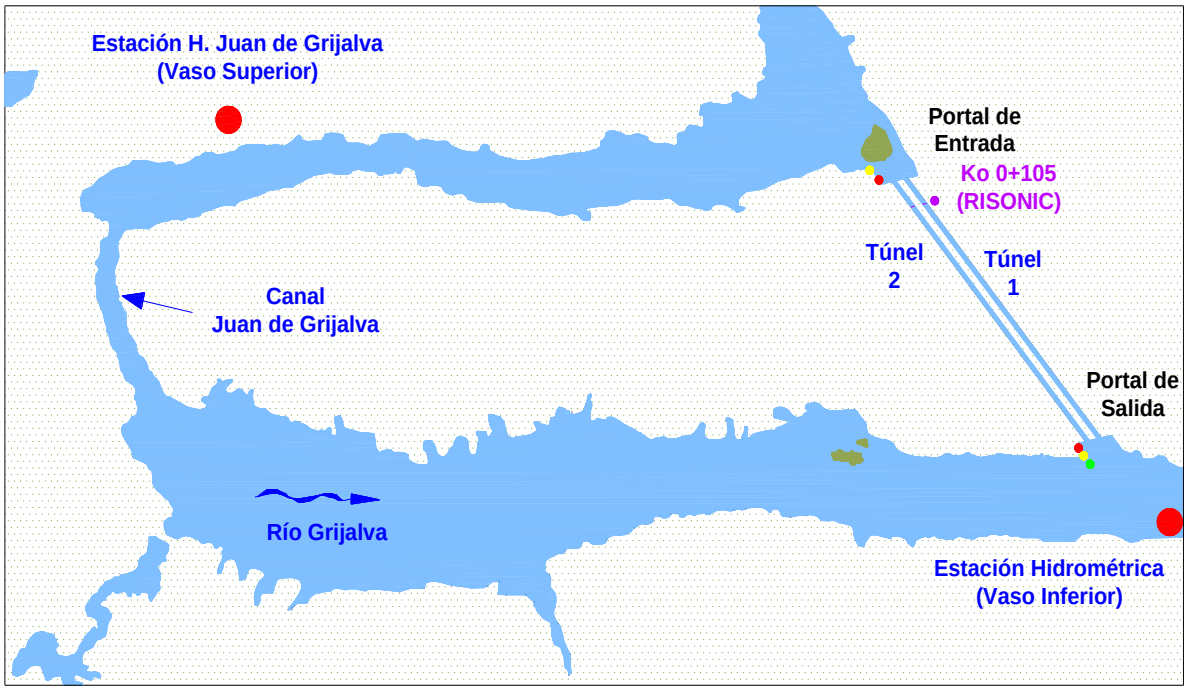


Figura 1. Localización de los túneles de comunicación del río Grijalva y el canal Juan de Grijalva después del deslizamiento.

Entre las acciones tomadas para hacer frente a caudales de hasta 3 500 m^3/s se encuentran: 1) la construcción de un canal en la zona de reducción siguiendo la traza del río; 2) la suspensión temporal de la generación de la C.H. Malpaso; 3) disminución del nivel de la C.H. Peñitas con la operación del vertedor y la generación, y 4) la construcción de dos túneles de sección portal de 14 x 14 m que complementan la capacidad de conducción del río entre la C.H. Malpaso y la C.H. Peñitas. En este último punto, dichos túneles deberían ser monitoreados en su eficiencia

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

en la conducción hidráulica, así como en los movimientos geológicos naturales de la estructura mediante instrumentos de medición hidráulica y de geotecnia.

La instrumentación hidráulica se utilizó para medir niveles hidráulicos, velocidades de flujo en secciones definidas y gasto o caudal tanto en periodo de estiaje como de lluvias; así como para estudiar el parámetro de rugosidad compuesta representativo del túnel, lo que permitiría definir la capacidad hidráulica.

El objetivo general de este trabajo es presentar una metodología para obtener el parámetro de rugosidad compuesta representativo de los túneles de desvío en el río Grijalva a partir de mediciones directas cercanas a la pared, y posteriormente aplicar las teorías de capa límite de Prandtl-Von Kármán y la rugosidad equivalente de Nikuradse.

Los objetivos particulares son los siguientes: 1) estudiar el funcionamiento hidráulico de los túneles mediante instrumentación hidráulica; 2) estimar el parámetro de rugosidad de pared a partir de mediciones de velocidad en la zona de capa límite; 3) estimar el parámetro de rugosidad compuesta a partir de las mediciones puntuales y las teorías de capa límite de Prandtl Von-Kármán y Nikuradse; 4) analizar mediante un modelo matemático y el mínimo error cuadrado la ecuación empírica de mejor ajuste para el cálculo de rugosidad compuesta, y 5) obtener una curva gasto-rugosidades.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Lo anterior podrá coadyuvar en el diseño hidráulico de obras de desvío con rugosidad compuesta y su eficiencia en la capacidad de descarga. Esta investigación se realizó en condiciones de operación real.

Antecedentes

Seguridad de las obras de desvío y la rugosidad compuesta

De acuerdo con Marengo (2019) se deben tener en cuenta algunas consideraciones al diseñar y construir las obras de desvío. Se tiene la experiencia de enero de 1992 durante la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, donde se produjeron dos avenidas extraordinarias, lo que puso a prueba las condiciones de diseño en la cortina y la obra de desvío. La obra de desvío consistió en dos túneles sección portal de 16 x 16 m y longitudes de 1 100 y 1 200 m (Túnel 1 y Túnel 2, respectivamente), para una avenida máxima de 6 700 m^3/s,

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

además de contar con un dique fusible de 10 m y un canal por margen derecha. En 1990 (del 11 al 22 de agosto), durante la construcción se presentó una avenida de 5 300 m^3/s, lo que provocó un aumento en el embalse (102.60 msnm). En 1992 (del 16 al 20 de enero), se tuvo nuevamente una avenida de 10 800 m^3/s de gasto instantáneo y un gasto máximo diario de 9 334 m^3/s, que provocó un aumento en el nivel del embalse de la cota de 70 msnm a la cota de 108 msnm, lo que hizo rebasar la ataguía aguas arriba. Se tuvo que abrir el dique fusible y se comenzó a inundar entre la ataguía y la cortina para evitar un daño mayor y el colapso de la estructura. Se llegó a la cota máxima de 123.60 msnm, apenas por debajo de la cara de la cortina. Posteriormente se tuvo una segunda avenida de 7 700 m^3/s, alcanzando la cota de 112.40 msnm, llenando de nuevo el recinto entre la ataguía y la cortina, lo que provocó una deformación en la ataguía y retraso en el programa de construcción de la estructura.

Lo anterior dejó las siguientes lecciones y experiencias en cuanto a las obras de desvío: 1) la importancia de colocar un dique fusible para salvaguardar la integridad de la ataguía; 2) la ventaja de colocar concreto hidráulico tan sólo en la plantilla de los túneles permitió pasar de 164 a 188 años en periodo de retorno (*Tr*), asimismo, al cambiar a concreto lanzado en las paredes y bóveda permite pasar a un *Tr* de 313 años, que representa un aumento significativo en la seguridad del sistema hidráulico, geológico y estructural, lo que también permite conseguir ahorros significativos en las obras de desvío. Derivado de lo anterior nace

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

el concepto de "rugosidad compuesta", que puede implementarse con un análisis de riesgo para cada caso de diseño de obras de desvío.

Aspectos generales de rugosidad compuesta en túneles o canales

Sea un canal o túnel cuya sección transversal consiste en subsecciones de diferentes formas (circular, trapecial, arco, herradura, etc.), para el caso de la rugosidad compuesta el factor principal es el coeficiente de resistencia n, el cual puede ser combinado en plantillas, paredes y bóveda. Este coeficiente modifica la distribución de velocidad a lo largo de la sección transversal (Marengo, 2019). Para su estudio existen diversas ecuaciones que permiten definir su valor de forma homogénea considerando sólo el perímetro mojado (Marengo & Arreguín, 2008). El estudio de los efectos de la variación de la rugosidad en el flujo ha sido estimado por diversos análisis: mediante modelos físicos, numéricos, bidimensionales, 2D y tridimensionales, al igual que con la instrumentación en sitio combinado con los análisis numéricos teóricos y empíricos, objeto de estudio de la presente investigación.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La resistencia al flujo depende de cuatro componentes de acuerdo con Rouse (1965): 1) la capa de fricción, 2) el arrastre, 3) la resistencia de deformación y 4) la resistencia asociada con la inestabilidad del flujo. Ecoeficiente de resistencia *f* de Weisbach está en función (F) de:

$$f = F(\boldsymbol{Re}, k, \eta, N, F, U) \quad (1)$$

Donde $\boldsymbol{Re}$ es el número de Reynolds; k, la rugosidad relativa, que se expresa como $ks/Rh\ k$, donde ks es el equivalente a la rugosidad de la superficie de la pared y Rh es el radio hidráulico del flujo; η, función de la forma geométrica de la sección transversal; N, el número de uniformidad del canal tanto en el contorno como en el plano; F, el número de Froude, y U es el grado de inestabilidad del flujo. Rouse (1965) demostró que el diagrama de Moody es un caso especial de la Ecuación (1) para flujo constante en tuberías rectas rígidas de diámetro constante al sólo considerar dos de los seis parámetros independientes, que son: el número de Reynolds y la rugosidad relativa $ks/\boldsymbol{Re}$; este último permite calcular la rugosidad de Nikuradse.

Las fórmulas usadas por lo común en canales abiertos con flujo uniforme para calcular el coeficiente de resistencia son:

Ecuación de Manning:

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$V = \frac{K_n}{n} Rh^{2/3} S_f^{1/2} \quad (2)$$

Ecuación homogénea de Manning:

$$V = \frac{g^{1/2}}{n_g} Rh^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3)$$

Ecuación de Darcy-Weisbach:

$$V = \left(\frac{2g}{f}\right)^{1/2} D^{1/2} \left(\frac{h_f}{L}\right)^{1/2} \quad (4)$$

Ecuación de Chézy:

$$V = C{R_h}^{1/2} S_f^{1/2} \quad (5)$$

Ecuación de Hazen-Williams:

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$V = K_{HW} C_{HW} R^{0.63} S_f^{0.54} \quad (6)$$

Donde V es la velocidad media de la sección transversal; n, f y C, los coeficientes de resistencia de Manning, Weisbach y Chézy, respectivamente; R_h, el radio hidráulico; S_f, la pendiente de fricción; g, la aceleración de la gravedad, y $K_n = 1 m^{1/2}/s$.

Los coeficientes de resistencia se pueden relacionar utilizando las ecuaciones anteriores:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{K_n}{\sqrt{g}} \frac{Rh^{1/6}}{n} \frac{Rh^{1/6}}{n_g} = \frac{V}{\sqrt{gRhS_f}} \quad (7)$$

De acuerdo con Marengo (2019), en la práctica profesional se sigue empleando la ecuación de Manning, que en el caso de un flujo uniforme y desde el punto de vista espacial (Chow, 1959) está definido como aquel en el que el tirante, el área hidráulica, la velocidad y la descarga en cada sección del túnel son constantes, y en que la pendiente de energía S_f, la de la superficie del agua S_w, y el del fondo del canal S_0 son paralelos, es decir: $S_w = S_f = S_0$. El denominador se llama velocidad cortante (V_*), que se define como:

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$V_* = \sqrt{gRhS_f} \tag{8}$$

El cual permite determinar el coeficiente de fricción C_f:

$$C_f = \left(\frac{V_*}{V}\right)^2 \tag{9}$$

De acuerdo con la Ecuación (9) y la Ecuación (7), se puede expresar lo siguiente:

$$C_f = \frac{f}{8} = \frac{g}{c^2} = \frac{g}{k_n^2}\frac{n^2}{R_h^{1/3}} = \frac{n_g^2}{R_h^{1/3}} \tag{10}$$

Cuando se consideran diversos materiales de rugosidad, por ejemplo concreto hidráulico en la plantilla y paredes, y concreto lanzado en bóveda o roca, el valor de n de la Ecuación (2) es recomendable estimar un coeficiente representativo de las rugosidades al que se le denominará en adelante "coeficiente de rugosidad equivalente", que además cambiará en función del tirante hidráulico (Marengo, 2019).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Diseño experimental

Instrumentación para la medición de variables hidráulicas

Características geométricas e hidráulicas de los túneles

La investigación está centrada en el caso de estudio de los túneles de comunicación del vaso superior e inferior del río Grijalva, aguas arriba de la C.H. Peñitas (Ángel Albino Corzo), cuyas características se mencionan a continuación.

Consiste en dos túneles (T1 y T2) ubicados en margen izquierda del río Grijalva, de sección portal de 14 m de ancho por 14 m de altura, y plantilla horizontal de concreto hidráulico y paredes y bóveda de concreto lanzado (Tabla 1), los cuales contribuyen a la regulación de la operación entre las dos centrales Malpaso y Peñitas (Tabla 2).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 1. Características geométricas de los túneles.

Túnel 1 y 2		
Gasto de diseño	2 604.00	m^3/s
Periodo de retorno	10 000	años
Nivel del embalse	105.99	m
Longitud túnel 1	1 200.96	m
Longitud túnel 2	1 187.04	m
Pendiente	Horizontal	-
Canal de llamada y salida comunes, elev	76.50	m
Sección portal	14 x 14	m
Radio bóveda	7.00	m

Tabla 2. Niveles de operación de la C.H. Peñitas y la C.H. Malpaso.

Presa Peñitas	
Elevación NAME	95.50 m
Elevación NAMO	87.40 m
Elevación NAMINO	85.00 m

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Elevación labio superior compuertas del vertedor	91.14 m
Unidades de generación	4.00
Gasto por unidad	349.00 m³/s
Presa Malpaso	
Elevación media desfogue obra de toma	86.50 m
Unidades de generación	6.00
Gasto por unidad	240.00 m³/s

Instalación de la instrumentación

Se realizó un proyecto de instrumentación hidráulica que consistió en la instalación de 53 sensores o celdas de medición de presión hidrostática, programadas para medir niveles hidráulicos, de los cuales 24 corresponden a cada túnel y separadas 50 m cada una (en cada túnel), así como cinco adicionales a lo largo de cada uno de los portales de entrada y salida (Figura 2).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

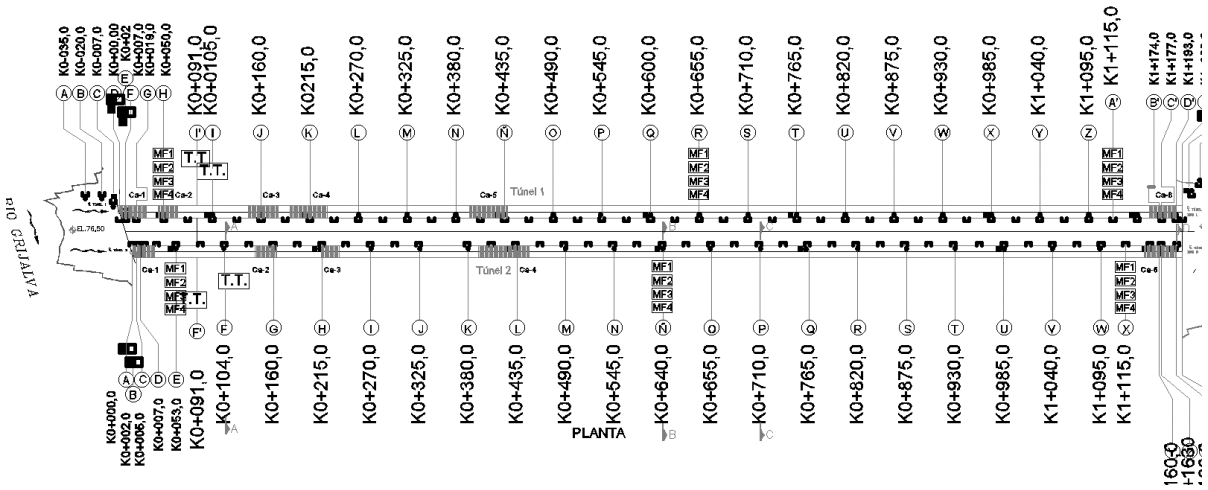


Figura 2. Localización de celdas en los túneles (túnel 1 superior y túnel 2 inferior en la figura).

Las celdas de presión o *cells* (en inglés), o sensores de presión, son de tipo "cuerda vibrante", las cuales quedaron instaladas dentro del concreto en la parte cóncava que une la pared con la plantilla en la sección transversal del túnel; a esa zona se le conoce como "chaflán" (Figura 3). Los sensores contienen un cable o hilo vibrante que detecta la presión hidráulica por medio de un diafragma que transforma la frecuencia de resonancia a un valor de presión hidráulica y por lo tanto a un valor de nivel hidráulico. Los sensores se calibran previamente en laboratorio y se realiza la programación en el sistema SCADA para transformarlos a valores de tirantes hidráulicos o de niveles hidráulicos en msnm.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

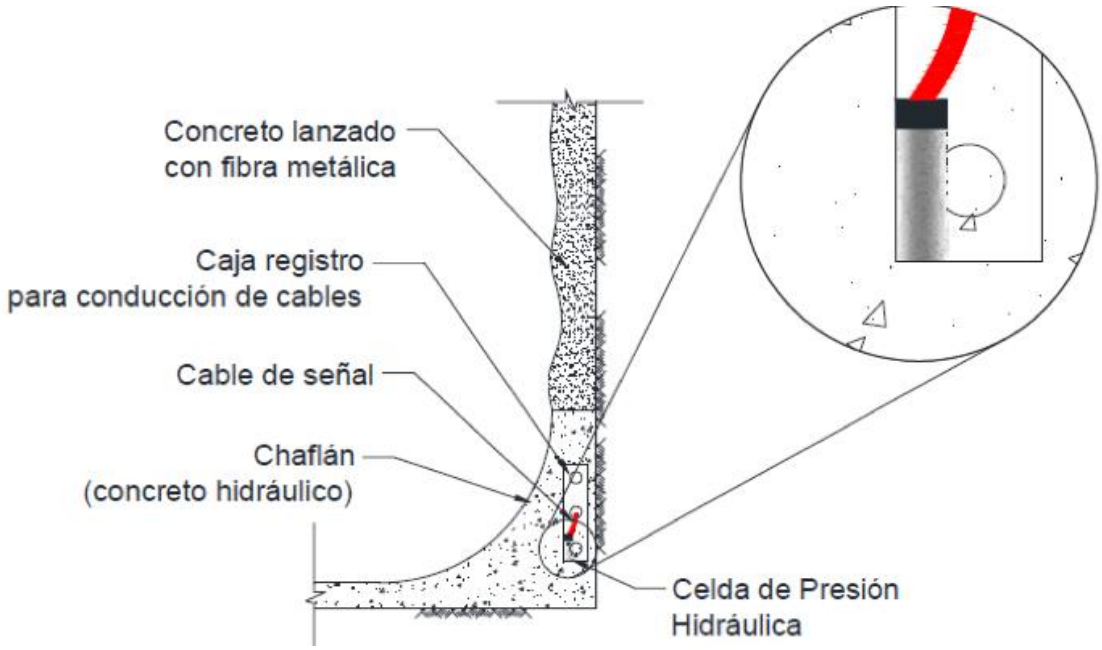


Figura 3. Colocación de celdas dentro del "chaflán".

Para el gasto o caudal se instaló un módulo de equipos *doppler* por cada túnel de tipo "tiempo en travesía (T.T.)" en las paredes. Cada módulo está localizado entre el cadenamiento 0+091 y el 0+105 (Figura 4); ello permitió que no se tuviera influencia por el efecto local de la entrada. El módulo consiste en cuatro pares (ocho sensores) de medición a diferentes alturas: a 2.5, 5, 6.5 y 8 m (Figura 5). Funciona para un rango de velocidades de ±20 m/s para canales con un ancho desde 0.75 m hasta 100 m, y temperaturas máximas y mínimas desde -20 °C hasta +70 °C, con una variación de la precisión de sólo un 0.5 %.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

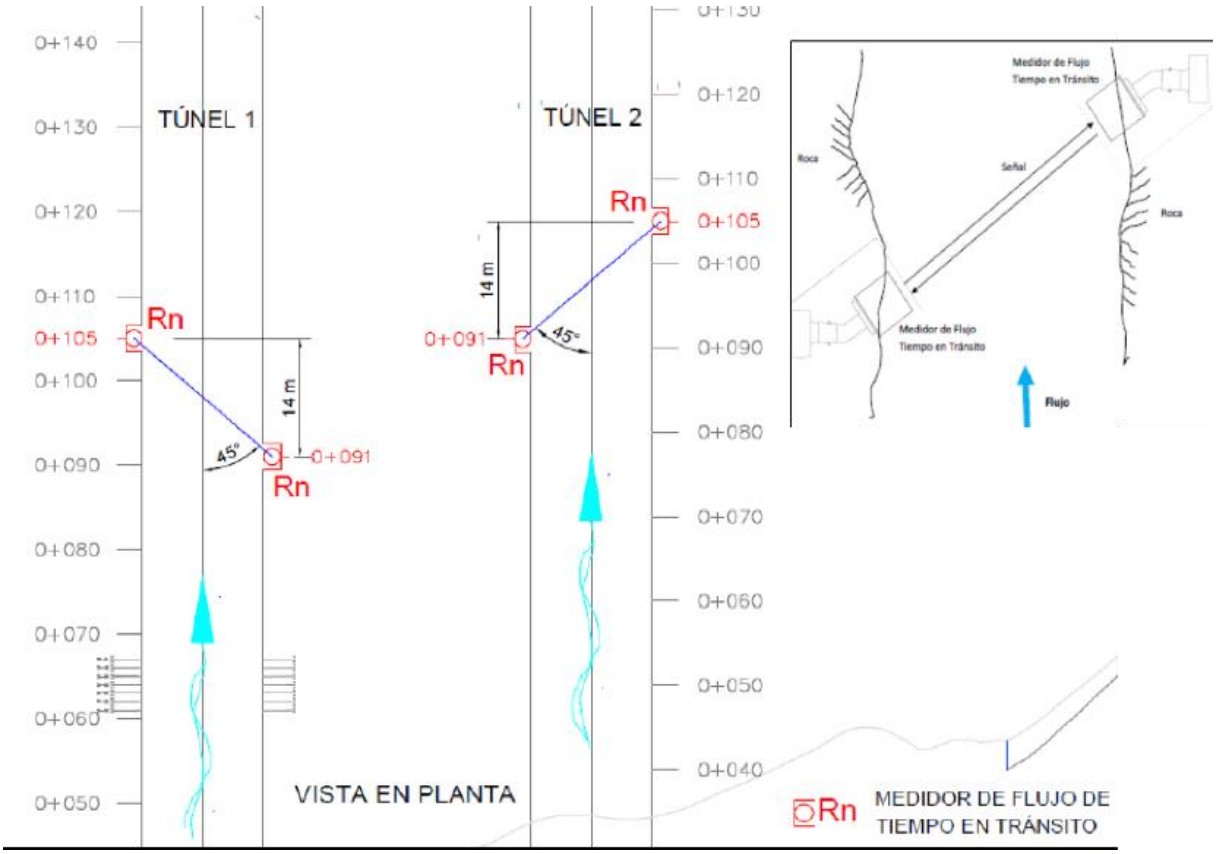


Figura 4. Ubicación de medidores "tiempo en travesía" (en planta).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

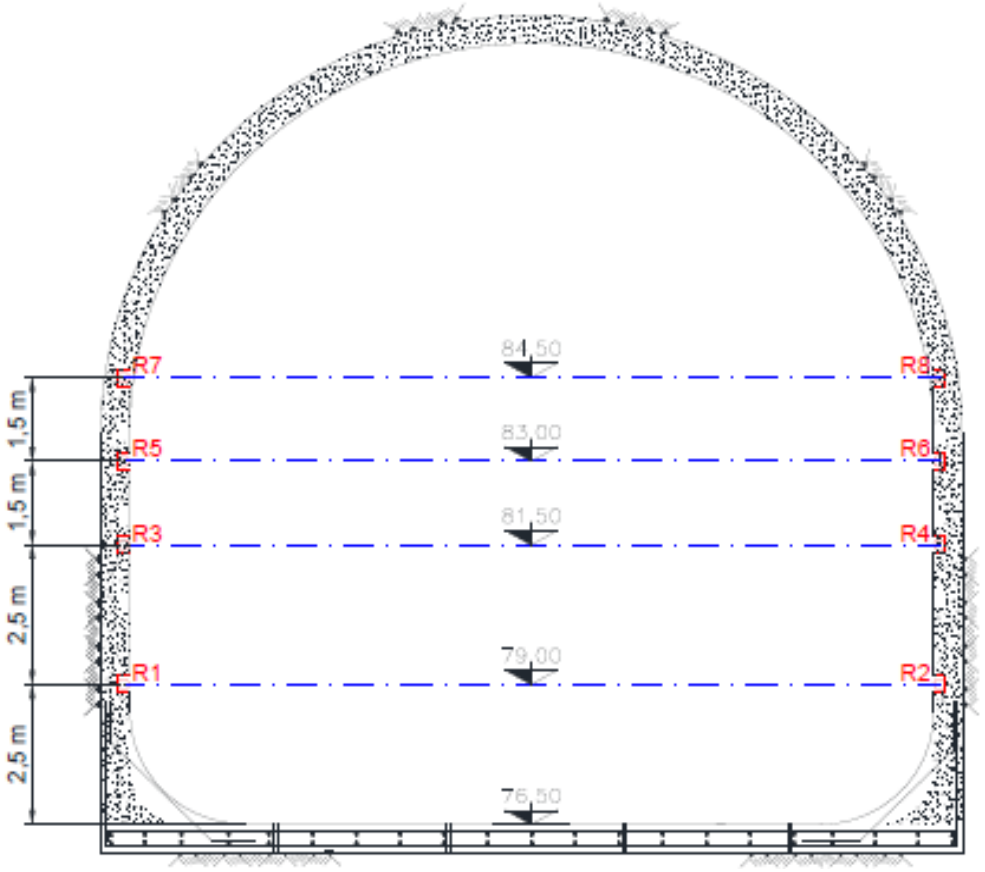


Figura 5. Ubicación de medidores "tiempo en travesía" (en perfil o sección).

El concepto de T.T. se debe a que el equipo envía un haz sonoro a otro instrumento instalado a 45 grados y a la misma elevación en la pared opuesta, midiendo en cada par el tiempo que éste tarda en regresar de aguas abajo hacia aguas arriba, con lo que se calcula la velocidad del fluido. Dado que conducen agua con una cantidad muy pequeña de

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

partículas en condiciones normales se favorece el funcionamiento de los medidores T.T.

Para la medición de velocidades cercanas a la pared se instalaron cuatro equipos también tipo *doppler*, pero de frecuencia mayor (3 000 kHz), lo que les permite medir velocidades a partir de 0.1 a 5.0 m desde la pared. Cada equipo tiene dos sensores a 25º, que le brinda redundancia a la medición. Se colocaron en tres secciones por túnel: K0+050, K0+655 y K1+115 (Figura 6), así como a diferentes alturas: 2.5, 5, 6.5 y 8 m (Figura 7), para medir un espectro general en la sección. Su configuración quedó programada para medir a partir de 10 cm de la pared y hasta 1.5 m de distancia, pues el objetivo era medir en la zona de influencia de la pared. Este equipo tiene una variación en la precisión de sólo 0.1 %; mide en profundidades de hasta 30 m y sus rangos de velocidad son de ± 6 m/s.

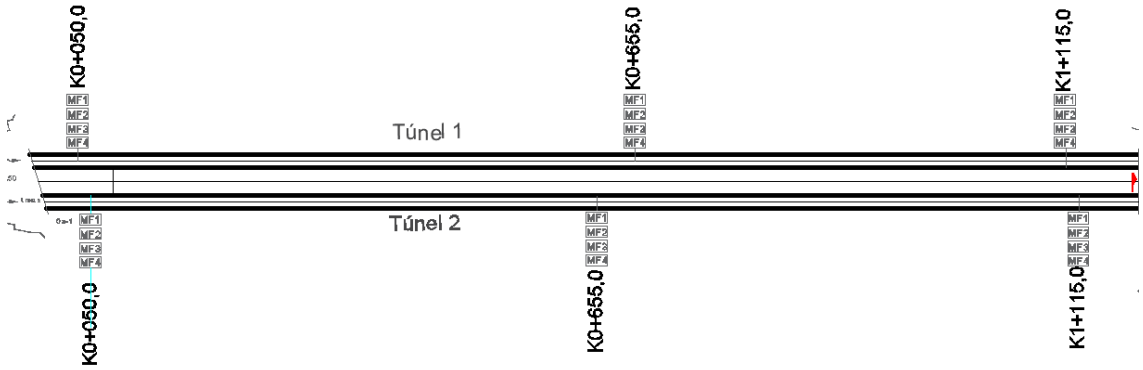


Figura 6. Ubicación de medidores de velocidad *doppler* (en planta).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

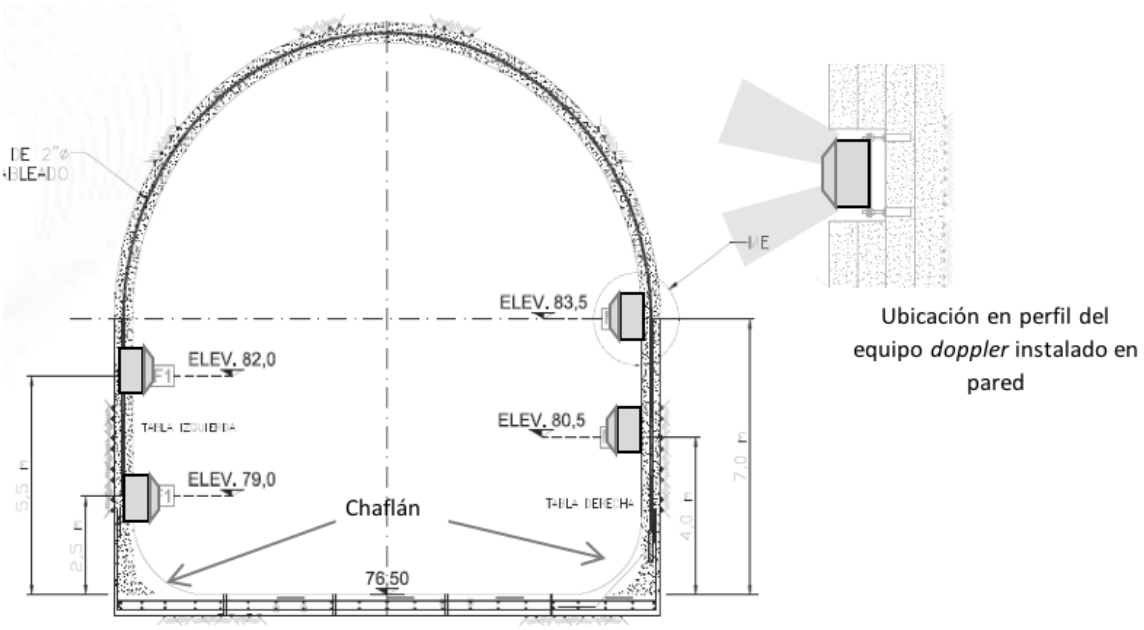


Figura 7. Ubicación de medidores de velocidad *doppler* (en sección).

Campaña de aforo en el portal de entrada

Con el propósito de verificar la certidumbre en las variables hidráulicas se realizó una campaña de aforo en el canal de llamada de los portales de entrada a los túneles (Figura 1), y se comparó con el gasto de los

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

medidores tipo T.T. instalados dentro del túnel. En el aforo se utilizó un perfilador acústico movible *doppler* (ADCP) con las siguientes características: profundidad de 75 cm a 30 m; variación de la precisión de 0.5 %; velocidades ±20 m/s; y temperaturas máximas y mínimas de -5 °C a +45 °C.

Se obtuvieron aproximaciones de caudal del *doppler* movible ADCP con respecto al medidor T.T. del -3 al 8 %; dicha diferencia es aceptable sumando las tolerancias de ambos equipos. Se concluye que el medidor tipo T.T. instalado dentro de los túneles da una mejor calidad de medición instantánea en cada lectura: su configuración está diseñada para ajustarse con los otros pares de medidores en caso de llegar a faltar alguno; cuenta con un 0.5 % de margen de error absoluto, y sus parámetros hidráulicos obedecen a las teorías y leyes fundamentales de la mecánica de fluidos con aplicación a la distribución de velocidades en un canal con fondo rugoso.

Metodología

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Primera parte. Planteamiento teórico para el cálculo de la rugosidad compuesta de Manning, n_c

Una vez verificada la calidad de los datos de medición de gasto y velocidad se procede con el planteamiento teórico para el cálculo de la rugosidad compuesta n_c, partiendo de la ecuación de Bernoulli y la ecuación de Manning (Sotelo, 2002), donde se conocen todas las variables excepto la rugosidad (Figura 8).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

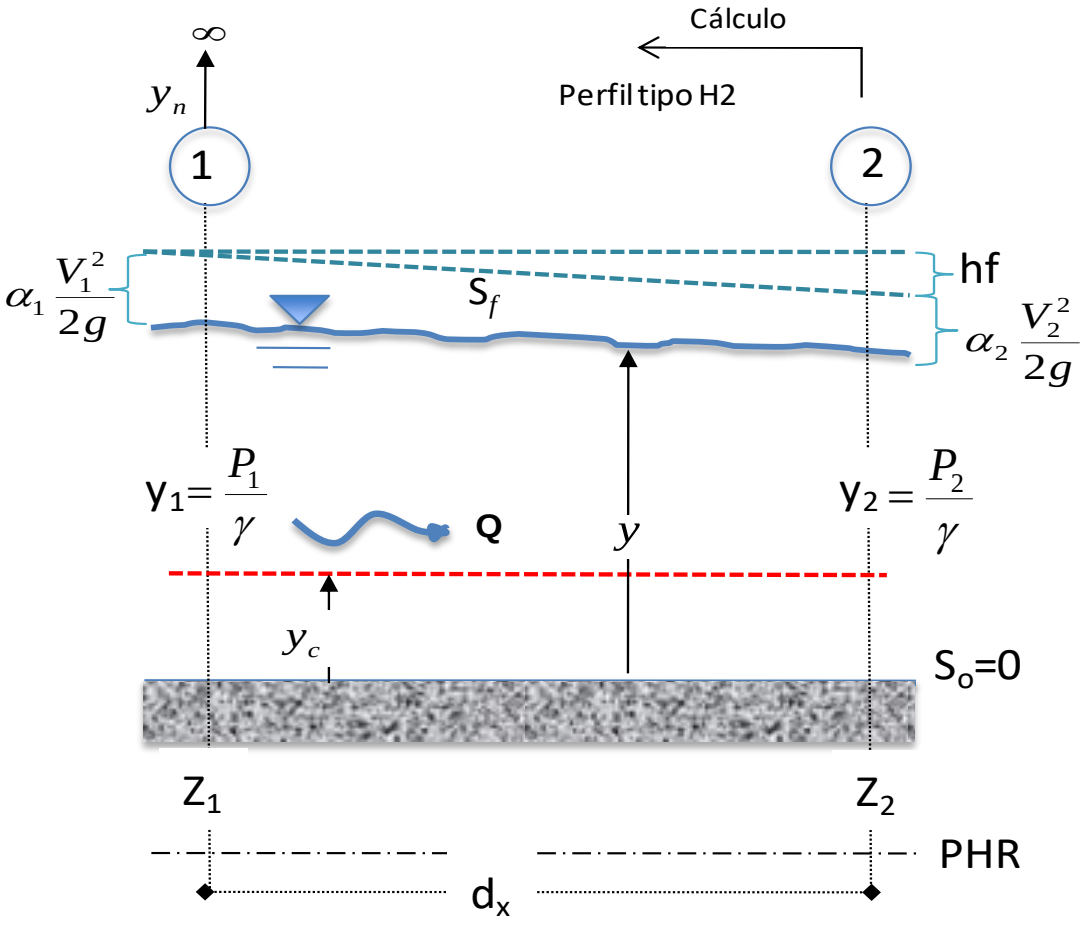


Figura 8. Planteamiento del cálculo hidráulico para estimar la rugosidad.

Si sólo desconocemos las pérdidas por fricción, h_f:

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$h_f = \int_1^2 S_f \, dx = \int_1^2 \frac{Q^2 {n_c}^2}{A^2 {R_h}^{4/3}} dx \approx \frac{\Delta x}{2} {n_c}^2 Q^2 \left(\frac{1}{A_1^2 {R_{h_1}}^{4/3}} + \frac{1}{A_2^2 {R_{h_2}}^{4/3}} \right) \quad (11)$$

Donde S_f es la pendiente de fricción; A, el área hidráulica; R_h, el radio hidráulico; k_l, el coeficiente de pérdida local en caso de existir; $y_1 - y_2$ es la diferencia de tirantes en una sección, como se observa en la Figura 8, y Q, el gasto, es conocido. Despejando la rugosidad compuesta en la sección n_c de la Ecuación (11) resulta:

$$n_c = \left[\frac{2(y_1 - y_2) + \frac{Q^2}{g}\left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} - \frac{k_l}{A_2^2} \right)}{Q^2 \Delta x \left(\frac{1}{A_1^2 R {h_1}^{4/3}} + \frac{1}{A_2^2 R {h_2}^{4/3}} \right)} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Donde:

$$\Delta x = (x_2 - x_1) \quad (13)$$

La rugosidad está compuesta por concreto hidráulico en la plantilla y "chaflán", y concreto lanzado en paredes y bóveda (Figura 9).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

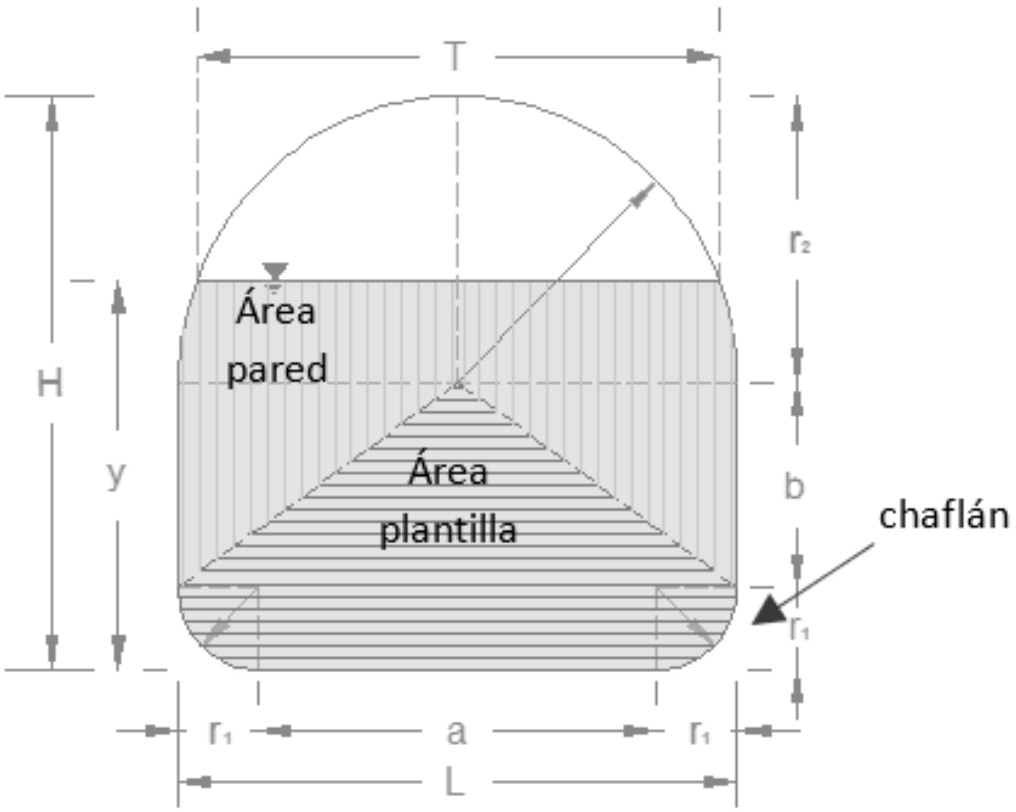


Figura 9. Sección portal con rugosidad compuesta.

Una vez obtenidos los valores de rugosidad n_c por cada tramo se lleva a cabo la discretización de la rugosidad equivalente k_s de Nikuradse para obtener el valor de rugosidad real de pared y plantilla.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Segunda parte. Estimación de la rugosidad equivalente de Nikuradse

Ley logarítmica de velocidades de Prandtl y Von Kármán,

La ley logarítmica desarrollada por Prandtl y Von Kármán establece que el perfil de velocidades cercano a la pared o en la zona de capa límite puede expresarse como sigue (Schlichting, 1979):

$$\frac{\overline{v}}{v_*} = \frac{1}{\kappa} ln \frac{y}{k_S} + B \qquad (14)$$

Donde $\overline{v}$ representa la velocidad longitudinal promediada en el sentido de Reynolds; v_*, la velocidad del fluido en la zona de influencia de la pared; y, la distancia a la pared; κ = 0.4, la constante de Von-Kármán; k_S, la rugosidad equivalente de Nikuradse, y $B = 8.5$ para canales de fondo rugoso. Por lo tanto, la Ecuación (4) para canales completamente rugosos queda:

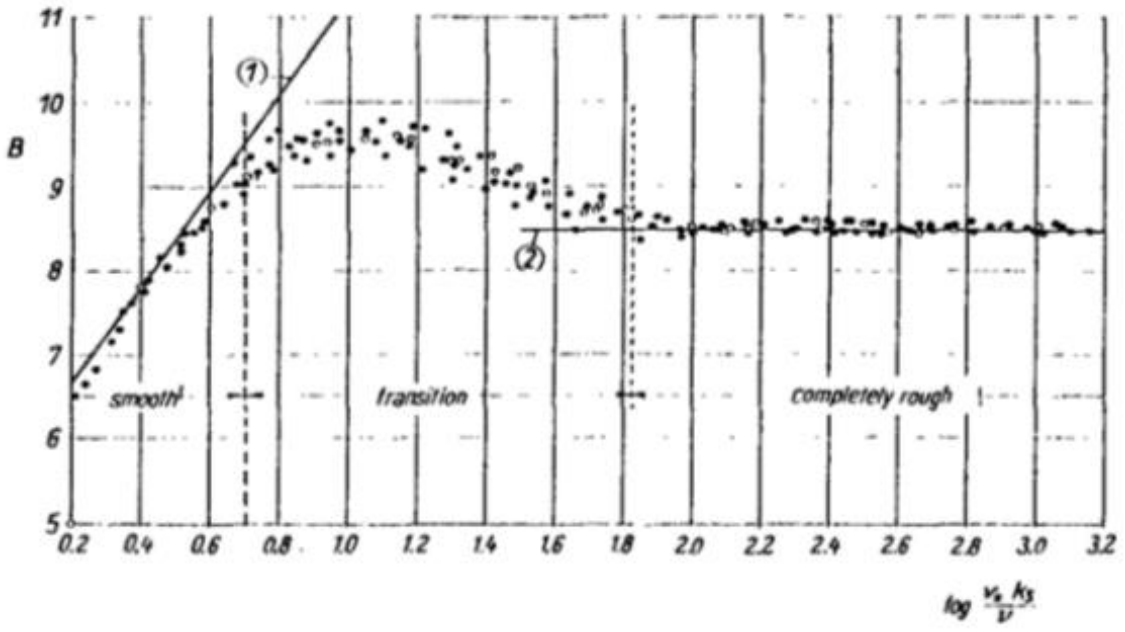
Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$\frac{\bar{v}}{v_*} = 2.5\, ln \frac{y}{k_s} + 8.5 \qquad (15)$$

Existen tres condiciones para determinar la constante B, que dependen del número de Reynolds, en términos de $v_* k_s / v$, donde es igual a cinco para paredes completamente lisas; de 5 a 70 corresponde a la transición de un régimen hidráulicamente liso a uno completamente rugoso; y mayor a 70 para flujo completamente rugoso (Schlichting, 1979) (Figura 10).



Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 10. Función B para la rugosidad en términos de $v_* k_s/v$ para rugosidad de arena de Nikuradse (Schlichting, 1979).

Capa límite y el espesor de desplazamiento

La capa límite de un flujo es la zona en la que el movimiento del fluido experimenta de manera dominante el efecto de frenado que provoca la presencia de la pared en vista de la condición de frontera de no deslizamiento; este concepto se debe a Ludwig Prandtl.

También se puede describir como el espesor necesario que debe desplazarse la pared para que el volumen perdido se iguale con el volumen perdido por el efecto viscoso de la pared (Figura 11). El desplazamiento vertical referido se denomina "espesor de desplazamiento" y se define como:

$$\delta^* = \int_0^{\delta} (1 - \frac{\overline{v}}{v}) \mathrm{dy} \qquad (16)$$

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Donde $\overline{v}$ es la velocidad longitudinal del flujo a una distancia de la superficie y de la pared, medida en forma perpendicular a la pared, y v es la velocidad fuera de la capa límite.

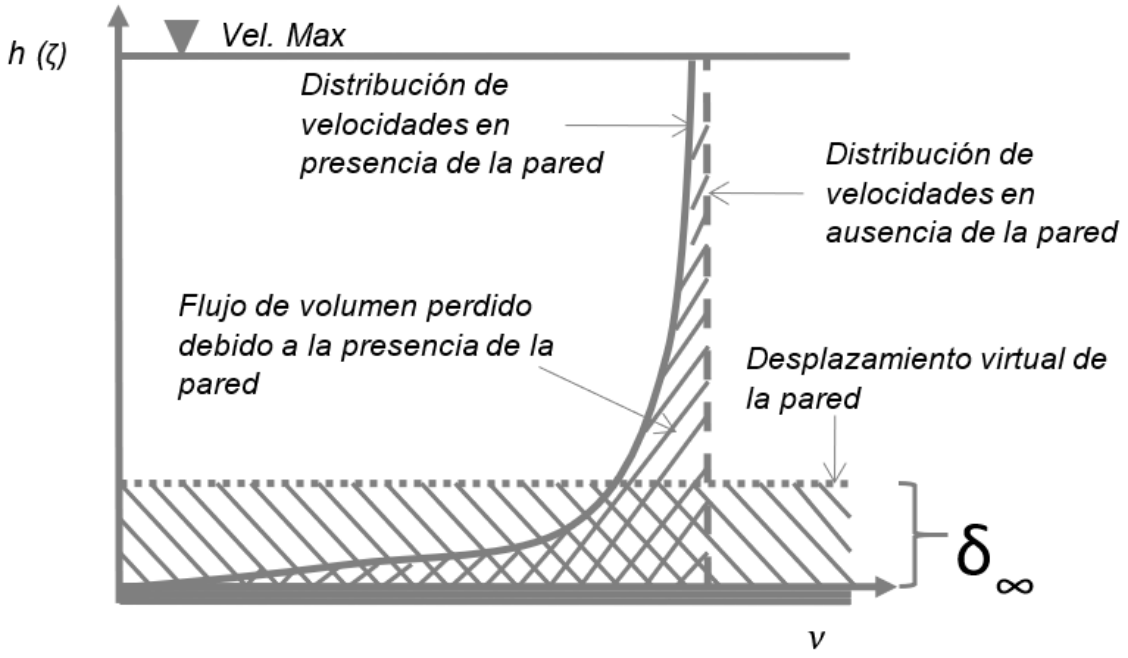


Figura 11. Interpretación del espesor de desplazamiento.

El valor del espesor de desplazamiento δ^* por lo general varía desde un décimo del espesor de la capa límite de acuerdo con la magnitud del número de Reynolds, donde pequeños rangos de viscosidad son grandes números de Reynolds.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Perfil de velocidades en la capa límite

Con base en lo anterior se planteó la metodología experimental basada en los registros de los medidores de velocidad *doppler* para velocidades a partir de 10 cm de distancia de la pared y hasta 2.1 m y con distancias de medición a cada 20 cm.

Primero se verifica si las velocidades registradas se encuentran dentro del espesor de desplazamiento (δ_d) a través de la siguiente ecuación:

$$\delta d = \left\{1 - \left[e^{-kB\,\frac{ks}{h}} + \frac{ln\frac{h}{ks}+Bk-1}{ln\frac{h}{ks}+Bk}\right]\right\} h \qquad (17)$$

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Donde δd es el espesor de desplazamiento; $\kappa = 0.4$, la constante de Von-Kármán; $B = 8.5$ para canales de fondo rugoso; k_s, la rugosidad equivalente de Nikuradse; y h es el valor medio del tirante en la sección.

Cada velocidad registrada por el sensor *doppler* considera diversas distancias en la longitud del espesor de desplazamiento, eso genera diversos perfiles de velocidad a lo largo de la influencia de la capa límite y el espesor de desplazamiento. Para efectos de análisis se consideran aquellos valores que se desarrollan como curvas de velocidad logarítmica.

Rugosidad equivalente de Nikuradse, *ks*

Para obtener la rugosidad equivalente de Nikuradse, a partir de la Ecuación (5) de la ley logarítmica se despeja el parámetro k_s:

$$k_s = e^{\left(kB - \frac{\beta}{v_*}\right)} \tag{18}$$

Donde:

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$\beta = \bar{v}_2 - \left(\frac{\bar{v}_2 - \bar{v}_1}{\eta_2 - \eta_1}\right)\eta_2 \quad (19)$$

$$\eta = ln\,\zeta = ln\ \ y \quad (20)$$

Donde β define el promedio de velocidades a partir de la primera lectura de medición, que va de 10 a 30 cm y posteriormente cada 20 cm, es decir, $\bar{v}_2 - \bar{v}_1$ se refiere al valor de velocidad obtenido con el sensor a 30 cm ($\bar{v}_2$) y a 10 cm ($\bar{v}_1$). Por otro lado, $\eta = ln\,\zeta = ln\ \ y$, donde y es la distancia con respecto a la pared desde el sensor (a 10 y 30 cm).

La velocidad en la región de la pared (v_*) queda definida como:

$$v_* = \alpha = \frac{\bar{v}_2 - \bar{v}_1}{\eta_2 - \eta_1} \quad (21)$$

De esta manera, obtenida la rugosidad equivalente k_s es posible calcular el valor del parámetro f, conocido como la f de Nikuradse.

De acuerdo con Aldama y Ocón (2002), en flujo uniforme en canales $S_f = S$, por lo que se puede encontrar una relación entre las fórmulas de Manning y la de Darcy-Weisbach, y se puede obtener la siguiente

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

expresión que relaciona el factor de rugosidad (n) con el factor de fricción adimensional (f):

$$n = (f/8g)^{1/2} Rh^{1/6} \quad (22)$$

Asimismo, en un fondo plano constituido por granos de arena, la rugosidad n es proporcional al diámetro de éstos elevados a 1/6 (Aldama, & Ocón, 2002), lo que resulta en la siguiente ecuación:

$$n = k_m g^{-1/2} ks^{1/6} \quad (23)$$

Donde k_m es una constante adimensional igual a 0.129765776 (Aldama & Ocón, 2002). Asimismo, considerando para canales anchos $R = h$ y despejando f se obtiene:

$$f = 8{k_m}^2 (ks/Rh)^{1/3} \quad (24)$$

De acuerdo con Aldama y Ocón (2002), las gráficas para el factor de fricción f correspondiente a conductos circulares trabajando llenos o a la mitad, y a canales anchos producen valores que no exceden más del 5

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

% de diferencia, por lo que se puede incluir la aplicabilidad de las ecuaciones anteriores.

Para el presente estudio se considera aplicar el procedimiento anterior, utilizando como valores de entrada de la rugosidad compuesta aquellos obtenidos a partir de la Ecuación (12) y para las secciones donde se localizan los medidores *doppler* (K0+050, K0+655 y K1+115). Asimismo, aquellos que se encuentren dentro de los intervalos de rugosidad de concreto hidráulico entre 0.012 y 0.019, y lanzado entre 0.020 y 0.028 recomendados (Marengo & Arreguín, 2008). También se consideran aquellos que se encuentren dentro del espesor de desplazamiento; esto es, se revisa el perfil de velocidades de cada uno de los registros, en donde sólo se eligen aquellos que se ajustan a la distribución logarítmica de velocidades en toda la longitud del espesor de desplazamiento.

Tercera parte. Modelo teórico unidimensional y calibración de resultados con aplicación en 18 ecuaciones empíricas de rugosidad compuesta

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Una vez obtenidos los parámetros de rugosidad de pared (Ecuación (22)), y conocida la rugosidad compuesta mediante la ecuación de la Energía (Ecuación (12)) resta aplicar cada una de las 17 ecuaciones empíricas de rugosidad compuesta conocidas (Tabla 3), para obtener el parámetro de rugosidad que mejor se aproxime a las mediciones.

Tabla 3. Ecuaciones empíricas para estimar el coeficiente de resistencia n_c en canales con rugosidad compuesta (Marengo & Arreguín, 2008).

		Supuestos	
Eqs	n_c	**Concepto**	**Ecuación**
A	$=\frac{\sum n_i A_i}{A}$	Suma de la componente *n* pesada por la relación de áreas o la velocidad al esfuerzo cortante total es la suma pesada de la velocidad al esfuerzo cortante de la subárea.	$\sqrt{gRS}=\sum\left(\frac{P_i}{P}\sqrt{gR_iS_i}\right)$ $(V_i/V)=(R_i/R)^{7/6}$
B	$=\sqrt{\sum n_i^2\frac{A_i}{A}}$	La fuerza de resistencia total es igual a la suma de las fuerzas de resistencia de las subáreas; o, n_i pesada por √Ai	$P\gamma RS=\Sigma P_i\gamma R_iS_i$ $(V_i/V)=(R_i/R)^{2/3}$
C	$=\frac{A}{\sum(A_i/n_i)}$	La descarga total es la suma de las descargas de subáreas	$Q=VA=\Sigma(V_iA_i)\Sigma Q_i$ $(S_i/S)=(R/R_i)^{4/3}$
D	$=\left[\frac{\sum(n_i^{3/2}A_i)}{A}\right]^{2/3}$	Igual que la ecuación E de Horton y Einstein, pero erróneamente derivada	

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

E	$=\left[\frac{1}{P}\sum\left(n_i^{3/2}P_i\right)\right]^{2/3}$	Velocidad media de la sección transversal total es igual a la velocidad media de la subárea.	$V = V_i$ $A = \Sigma A_i$ $S = S_i$
F	$=\frac{P}{\sum(P_i/n_i)}$	La descarga total es la suma de las descargas de las subáreas.	$Q = \Sigma Q_i$ $(S_i/S) = (R/R_i)^{10/3}$
G	$=\left[\frac{1}{P}\sum\left(n_i^2P_i\right)\right]^{1/2}$	La fuerza de resistencia total, F, es la suma de las fuerzas de resistencia de la subárea, ΣFi	$P\gamma RS = \sum P_i\gamma R_iS_i$ $(V_i/V) = (R_i/R)^{1/6}$
H	$=\frac{\sum(n_iP_i)}{P}$	La velocidad cortante total es la suma de la velocidad cortante de la subárea; o la rugosidad componente que contribuye es proporcionalmente lineal al perímetro mojado.	$\sqrt{gRS} = \sum\left(\frac{P_i}{P}\sqrt{gR_iS_i}\right)$ $(V_i/V) = (R_i/R)^{1/6}$ *or* $n_cP = \sum(n_iP_i)$
I	$=\left[\frac{R^{1/3}}{P}\sum\frac{n_i^2P_i}{R_i^{1/3}}\right]^{1/2}$	La fuerza de resistencia total, F, es la suma de fuerzas de resistencia de la subárea, ΣFi	$P\gamma RS = \sum P_i\gamma R_iS_i$ $(V_i/V) = 1$
J	$=\left[\frac{\sum n_i^2P_iR_i^{2/3}}{PR^{2/3}}\right]^{1/2}$	La fuerza de resistencia total es igual a la suma de las fuerzas de resistencia de la subárea.	$P\gamma RS = \sum P_i\gamma R_iS_i$ $(V_i/V) = (R_i/R)^{1/2}$
K	$=\frac{PR^{7/6}}{\sum\frac{P_i}{n_i}R_i^{7/6}}$	La descarga total es la suma de las descargas de la subárea.	$Q = VA = \Sigma(V_iA_i)$ $(S_i/S) = (R/R_i)$
L	$=\frac{PR^{5/3}}{\sum\frac{P_iR_i^{5/3}}{n_i}}$	La descarga total es la suma de la descarga de las subáreas.	$Q = VA = \Sigma(V_iA_i)$ $(S_i/S) = 1$ $R = A/P$

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

M	$=\frac{\sum P_i R_i^{5/3}}{\sum \frac{P_i R_i^{5/3}}{n_i}}$	Igual que la ecuación L, pero con la definición modificada de R.	$Q = VA = \Sigma(V_i A_i)$ $(S_i/S) = 1$ ***R*** de $\frac{PR^{5/3}}{\sum P_i R_i^{5/3}} = \frac{AR^{2/3}}{\sum A_i R_i^{2/3}} = 1$
N	$=\frac{\sum\left(n_i P_i / R_i^{1/6}\right)}{P/R^{1/6}}$	La velocidad al esfuerzo total $\sqrt{\mathrm{gRS}}$ es la suma de las velocidades al esfuerzo cortantes de la subárea.	$\sqrt{gRS} = \sum\left(\frac{P_i}{P}\sqrt{gR_iS_i}\right)$ $(V_i/V) = 1$
O	$=\frac{\sum\left(n_i P_i R_i^{1/2}\right)}{PR^{1/2}}$	La velocidad al esfuerzo cortante total es la suma de la velocidad al esfuerzo cortante de la subárea.	$\sqrt{gRS} = \sum\left(\frac{P_i}{P}\sqrt{gR_iS_i}\right)$ $(V_i/V) = (R_i/R)^{2/3}$
P	$=\frac{\sum\left(n_i P_i R_i^{1/3}\right)}{PR^{1/3}}$	La velocidad cortante total es la suma de la velocidad cortante de la subárea.	$\sqrt{gRS} = \sum\left(\frac{P_i}{P}\sqrt{gR_iS_i}\right)$ $(V_i/V) = (R_i/R)^{1/2}$
Z	$= exp\left[\frac{\sum P_i h_i^{3/2} ln\ r}{\sum P_i h_i^{3/2}}\right.$	La distribución de la velocidad logarítmica sobre la profundidad *h* para el canal ancho.	$S = S_i\ ,\ Q = \sum Q_i$ $\frac{Q_i}{2.5\sqrt{gS}} = h_i^{\frac{3}{2}} P_i\left[ln\left(\frac{10.93h_i}{k_i}\right)\right]$ $\frac{Q_i}{2.5\sqrt{gS}} = \Sigma h_i^{3/2} P_i\left[ln\left(\frac{1093h_i}{k_i}\right)\right]$ $n = 0.0342k$

Esto se logra mediante un modelo teórico unidimensional que toma en cuenta dichas ecuaciones y calibra los registros. El modelo teórico unidimensional tiene como variable el coeficiente de rugosidad del concreto lanzado n_{cl} y está planteado para el caso de un perfil horizontal

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

tipo H2, es decir, donde la sección de control se encuentra aguas abajo, y la ecuación que lo resuelve es:

$$F(y) = \underbrace{Z_S - Z_{S-1} + Y_S + \frac{Q^2}{{A_S}^2 2g}(1+kl) + \frac{Q^2 n^2}{{A_S}^2 R {h_S}^{\frac{4}{3}}} \cdot \frac{\Delta x}{2}}_{conocido \quad (Ys)} = \underbrace{Y_{S-1} + \frac{Q^2}{{A_{S-1}}^2 2g} - \frac{Q^2 n^2}{{A_{S-1}}^2 R {h_{S-1}}^{4/3}} \cdot \frac{\Delta x}{2}}_{desconocido \quad (Ys-1)} \tag{25}$$

Se considera como un modelo casi permanente, ya que se analiza por gastos y registros puntuales, y se aplican las teorías para un flujo gradualmente variado.

El modelo parte de un valor conocido aguas abajo, que es el tirante medido por la celda. Teniendo el tirante existe una relación única para obtener las variables geométricas, como área, perímetro y radio hidráulico, las cuales previamente quedaron definidas mediante su fórmula correspondiente. Como variables se introducen el gasto, y la rugosidad de pared y plantilla obtenidas de las mediciones directas de los medidores *doppler* para cada caso. Este esquema se aplica a las 17 ecuaciones empíricas conocidas para estimar la rugosidad compuesta (Tabla 3). Lo anterior permite construir un perfil hidráulico que será ajustado con el perfil obtenido con los valores medidos de tirante mediante las celdas.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Para seleccionar la mejor ecuación de ajuste se utiliza el concepto del mínimo error cuadrado (MEC), donde se comparan las rugosidades compuestas obtenidas en las secciones de medición de los equipos *doppler* a partir de la ecuación de Bernoulli y Manning (Ecuación (12)) con respecto a las rugosidades compuestas obtenidas con las 17 ecuaciones empíricas. En ambas se integraron las rugosidades puntuales de pared y de plantilla obtenidas con los equipos *doppler* (ecuaciones (18) a (24)). Con lo anterior, el MEC obtenido permitirá definir la ecuación de mejor ajuste entre las 17 conocidas o definir una nueva ecuación de ajuste.

Resultados

Medición de variables hidráulicas

Se programó la medición de niveles hidráulicos con las celdas de presión cada hora y se obtuvieron valores de 8.72 a 10.66 m de tirante.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Las velocidades que se midieron con los equipos *doppler* a partir de 10 cm de la pared obtuvieron rangos de velocidad de 0.35 a 2.5 m/s. Sin embargo, dado que se tuvieron problemas de comunicación constante con los equipos de velocidad en el túnel 2, sólo se consideró para el estudio de la rugosidad la información del túnel 1.

Los gastos por los equipos *doppler* "tiempo en travesía" para ambos túneles (QT1+QT2) en suma registraron desde 117 hasta 575 m^3/s entre octubre de 2011 y febrero de 2012.

Rugosidad compuesta a partir de las ecuaciones de Bernoulli y de Manning, Ecuación (1) y Ecuación (2)

Los valores de rugosidad obtenidos para cada tramo de análisis se muestran en la Figura 12 y sólo se consideraron aquellos que se encontraban en los intervalos recomendados: concreto hidráulico entre 0.012 y 0.019, y lanzado entre 0.020 y 0.028 recomendados (Marengo & Arreguín, 2008).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

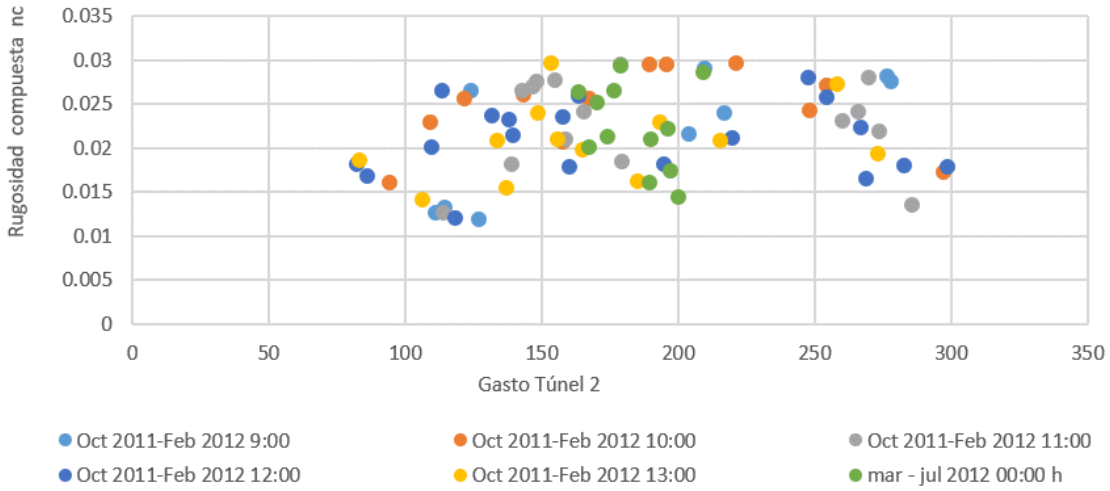


Figura 12. Valores de rugosidad compuesta obtenidos de la Ecuación (2) y dentro del intervalo recomendado (Marengo & Arreguín, 2008).

Rugosidad equivalente de Nikuradse (k_s), Ecuación (8), y espesor de desplazamiento (δd), Ecuación (7)

Se modelaron las velocidades obtenidas de equipos *doppler* en las secciones K0+050 y K1+115. En el equipo localizado en el K0+655 no se pudo extraer información. Las mediciones estaban programadas cada hora desde octubre de 2011 hasta octubre de 2012. Cada sección contaba con cuatro equipos *doppler* (Figura 6 y Figura 7) y se programaron con

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

los demás equipos de medición: los equipos modulares para gasto y las celdas para la medición del tirante hidráulico.

Algunas complicaciones encontradas fueron que no siempre se tenía una medición constante de todos los equipos para todos los intervalos de tiempo. Asimismo, en la época de lluvias se tenían daños constantes en la transmisión por las sobrecargas que se presentaban en la caseta de instrumentación, donde se tenían los sistemas "SCADA", lo que llevó a hacer reparaciones continuas durante todo ese tiempo. Debido a que se perdió el seguimiento del mantenimiento de los equipos, ya no se pudo continuar con el análisis de los datos en los túneles para condiciones de gasto mayores.

Se obtuvieron más de 200 perfiles de velocidad para cada intervalo de medición desde 1 hasta 24 h en un año de medición.

Se seleccionaron aquellos registros que pertenecían a un perfil logarítmico, que sumaron más de 300 perfiles para caudales entre 117 y 575 m^3/s, como los que se muestran en la Figura 13, Figura 14 y Figura 15.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

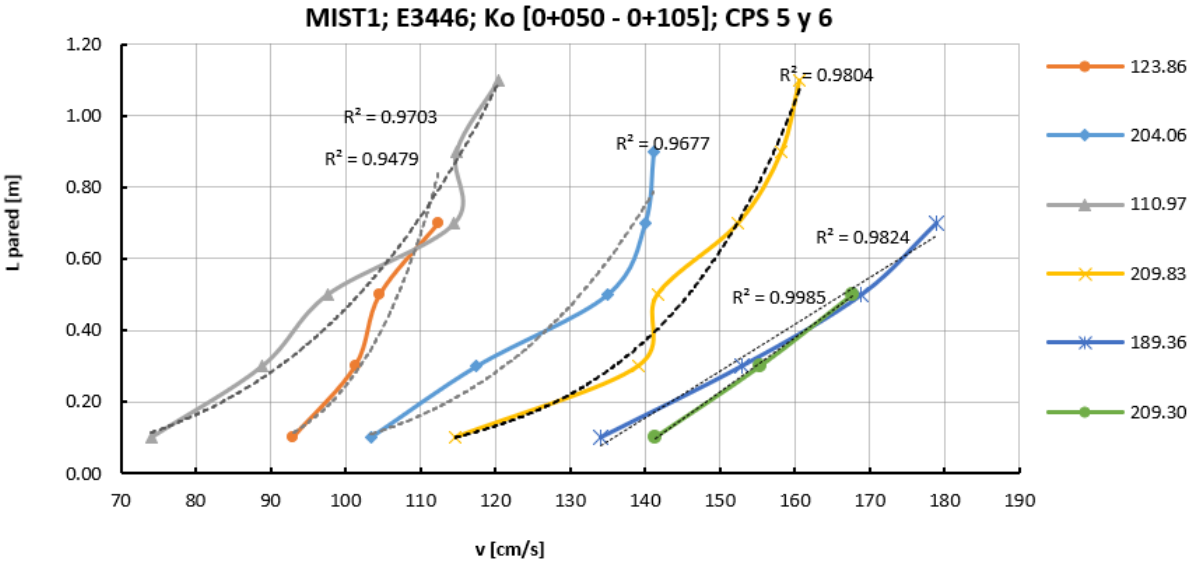


Figura 13. Perfiles de velocidad registrados por el equipo *doppler* para diferentes valores de gasto del medidor ubicado en la margen izquierda superior del túnel 1 (MIST1 K0+050).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

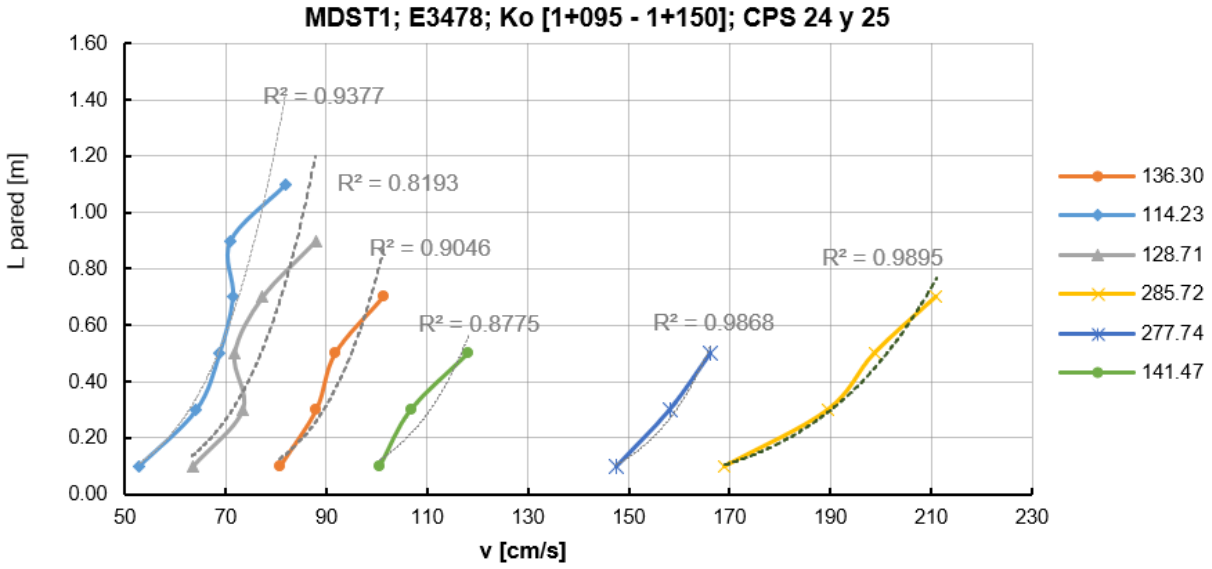


Figura 14. Perfiles de velocidad registrados por el equipo *doppler* para diferentes valores de gasto del medidor ubicado en la margen derecha superior del túnel 1 (MDST1 K1+095).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

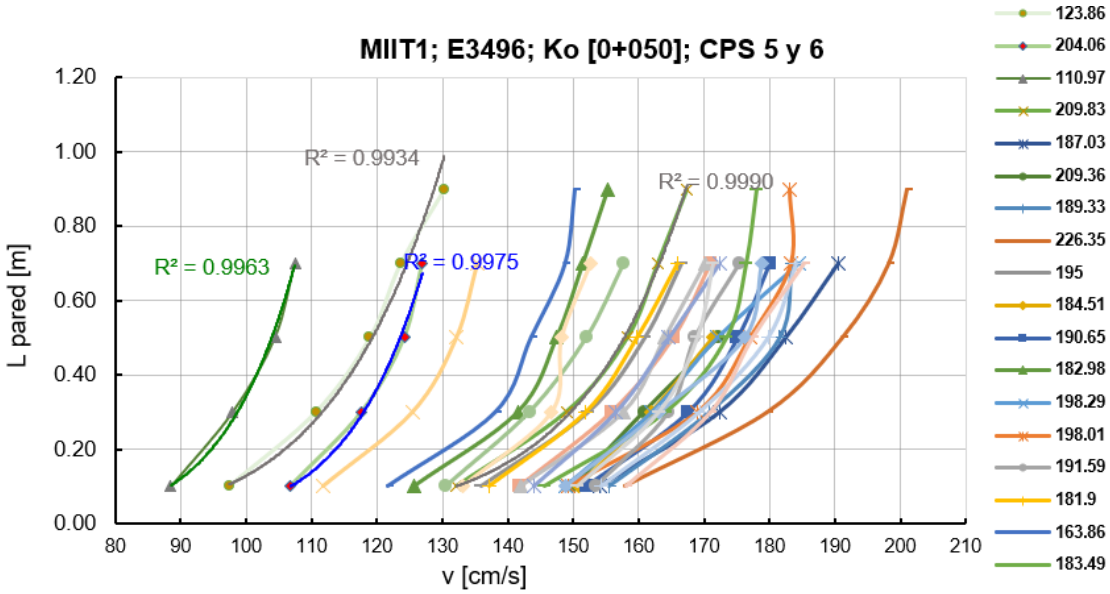


Figura 15. Perfiles de velocidad registrados por el equipo *doppler* para diferentes valores de gasto del medidor ubicado en la margen izquierda inferior del túnel 1 (MIIT1).

Se hicieron estimaciones para diferentes tirantes y se observó que el espesor de desplazamiento (δd) era del orden del 10 % del valor del tirante medido (Figura 16).

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

	C	H	I	J	K	L	M	N	O	P	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ
1																					
2	**INFORMACIÓN PROVENIENTE DE ARGONAUTS EN TÚNEL 1 Y DE CELD**																				
3																	Vbeam	0.533	m		
4	* revisados con la Ley Logarítmica																Press	0.099	dbar		
5				Ubicación													1 Vbeam =	1.85741	bar		
6			No.	1	2	3	4	y									1 bar =	10.2	mca		
7			Serie	MII T1	MIS T1	MDI T1	MDS T1	0+050	0+105	nc											
8				E3496	E3446	E3449	E3488	CPS-5	CPS-6												
9	Archivo	Celda	Q	I							Multi- Cell Data, Speed (cm/s)										δd
10		Fecha/hr	m³/s	h=2.5	h=5.5	h=4.0	h=7.0	m	m	Tramo 0+050 y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
11		OCTUBRE 09:00 (2011)									0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	
12	**MII009.ARG**	05/10/2011 09:06	136.30	-	-	-	-	-	-	-	**58.25**	**67.25**	**78.42**	**94.31**	**100.63**	**107.40**	**114.32**	**117.06**	**118.45**	**129.82**	0.807
13	**MIS006.ARG**		136.30	-	-	-	-	-	-	-	**78.03**	**96.73**	**97.52**	**103.49**	**113.10**	**121.54**	**116.22**	**126.92**	**131.75**	**130.22**	1.030
14	**MDI006.arg**		136.30	-	-	-	-	-	-	-	**93.67**	**104.38**	**110.76**	**118.76**	**131.63**	**130.19**	**128.13**	**132.75**	**130.32**	**129.04**	0.665
15	MDS006.arg		136.30	-	-	-	-	-	-	-	80.71	87.91	91.71	101.34	107.50	107.47	113.95	122.93	125.68	122.58	0.558
16	**MDS006.arg**	13/10/2011 09:00	114.23	-	-	-	-	-	-	-	**52.71**	**64.10**	**68.72**	**71.40**	**70.90**	**81.85**	**94.24**	**90.47**	**102.28**	**98.95**	0.971
17	**MDS006.arg**	18/10/2011 09:00	128.71	-	-	-	-	-	-	-	**63.45**	**73.31**	**71.70**	**77.20**	**87.81**	**92.52**	**98.13**	**102.99**	**100.23**	**107.20**	0.879
18	**MDS007.arg**	27/10/2011 09:00	285.72	-	-	-	-	-	-	-	**169.05**	**189.54**	**198.79**	**211.02**	**219.90**	**229.86**	**244.03**	**249.09**	**253.98**	**256.26**	0.688
19	MDS007.arg	31/10/2011 09:09	277.74	-	-	-	-	-	-	-	147.41	158.10	166.31	175.33	192.01	186.49	205.79	212.31	213.15	225.35	0.492
20		NOVIEMBRE 09:00 (2011)																			
21	**MDS007.arg**	02/11/2011 09:15	141.47	-	-	-	-	-	-	-	100.63	106.80	118.22	123.21	123.53	133.18	130.7	134.25	135.3	140.07	0.417
22		DICIEMBRE 09:00 (2011)																			
23	**1MII0002.arg**	15/12/2011 09:00	123.86	OK	-	-	-	**9.557**	**9.552**	0.02657	**97.46**	**110.69**	**118.91**	**123.62**	**130.29**	**132.58**	**131.01**	**131.31**	**129.7**	**128.47**	0.755
24	1MIS0003.arg		123.86	-	OK	-	-	9.557	9.552	0.02657	93.04	101.32	104.58	112.37	123.65	131.2	120.84	126.23	125.22	122.05	0.565
25	MDI0002.arg		123.86	-	-	OK	-	9.557	9.552	0.02657	73.51	79.00	82.14	84.71	84.02	83.53	83.1	87.7	83.1	89.51	0.496
26	1MDS0003.arg		123.86	-	-	-	OK	9.557	9.552	0.02657	65.09	70.19	82.93	87.06	86.3	82.9	85.24	84.05	91.22	83.74	0.514
27	1MII0006.arg	20/12/2011 09:00	204.06	OK	-	-	-	9.209	9.198	0.02159	106.78	117.68	124.19	126.93	131.94	132.94	133.08	130.49	130.75	126.54	0.602
28	**1MIS0003.arg**		204.06	-	OK	-	-	**9.209**	**9.198**	0.02159	**103.34**	**117.52**	**134.96**	**139.96**	**141.09**	**141.89**	**145.23**	**152.72**	**154.61**	**150.01**	0.735
29	**1MDI0004.arg**		204.06	-	-	OK	-	**9.209**	**9.198**	0.02159	**80.42**	**91.39**	**97.43**	**97.65**	**102.52**	**98.3**	**95.9**	**88.93**	**93.8**	**101.2**	0.732
30	**1MDS0005.arg**		204.06	-	-	-	OK	**9.209**	**9.198**	0.02159	**79.88**	**97.71**	**111.75**	**107.25**	**111.3**	**112.5**	**120.31**	**119.37**	**116.88**	**118.45**	0.974
31	1MII0006.arg	23/12/2011 09:00	110.97	OK	-	-		9.211	9.210	0.01267	88.48	97.95	104.42	107.45	110	106.81	108.87	111.5	110.34	106.59	0.623
32	**1MIS0003.arg**		110.97	-	OK	-	-	**9.211**	**9.210**	0.01267	**74.10**	**88.90**	**97.61**	**114.54**	**114.77**	**120.39**	**119.36**	**114.51**	**114.89**	**120.66**	0.918
33	1MDI0004.arg		110.97	-	-	OK	-	9.211	9.210	0.01267	73.72	85.00	75.34	75.62	71	69.9	72.36	71.3	65.4	67.53	0.787
34	**1MDS0005.arg**		110.97	-	-	-	OK	**9.211**	**9.210**	0.01267	**61.63**	**74.16**	**80.99**	**82.8**	**83.6**	**81.7**	**82.8**	**84.71**	**80.56**	**84.92**	0.927
35		ENERO 09:00 (2012)									74.10	88.90	97.61	114.54	114.77	120.39	119.36	114.51	114.89	120.66	
36																					
37		FEBRERO 09:00 (2012)																			
38	**1MII0001.arg**	18/02/2012 09:00	209.83	OK	-	-	-	**9.756**	**9.773**	0.02917	**132.21**	**148.96**	**158.29**	**162.9**	**167.37**	**165.27**	**169.15**	**166.72**	**165.62**	**163.86**	0.737
39	**1MIS0001.arg**		209.83	-	OK	-	-	**9.756**	**9.773**	0.02917	**114.68**	**139.11**	**141.66**	**152.46**	**158.24**	**160.64**	**164.49**	**166.18**	**164.41**	**167.47**	1.002
40	**1MDI0001.arg**		209.83	-	-	OK	-	9.756	9.773	0.02917	116.93	122.85	129.06	124.01	131.85	126.2	128.1	124.3	128.12	126.98	0.372
41	1MDS0001.arg		209.83	-	-	-	OK	9.756	9.773	0.02917	113.51	125.20	132.46	138.03	137.1	146.31	142.42	142.45	143.02	147.13	0.640

Figura 16. Revisión del espesor de desplazamiento δd.

Aplicando la Ecuación (22) y la metodología descrita en el subcapítulo de "Rugosidad equivalente de Nikuradse *ks*" se obtuvieron valores de rugosidad de pared n_{pared} (Tabla 4, Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20), para los equipos *doppler* instalados localizados en los cadenamientos K0+050 y K1+115 del túnel 1 y localizados a diferentes alturas: MII T1 es margen izquierda inferior del túnel 1 (h = 2.5 m); MIS

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

T1 es margen izquierda superior del túnel 1 (h = 5.5 m); MDI T1 es margen derecha inferior del túnel 1 (h = 4 m); MDS T1 es margen derecha superior del túnel 1 (h = 7 m).

Tabla 4. Valores de rugosidad de pared (n_{pared}) en concreto lanzado para los *doppler* en el K0+050 y el K1+115.

Sección 0+050		n_{pared}	h (m)
MII T1	E3496	0.0121	2.5
MIS T1	E3446	0.0154	5.5
MDI T1	E3449	0.0104	4
MDS T1	E3488	0.0193	7

Sección 1+115		n_{pared}	h (m)
MII T1	E3465	0.0278	2.5
MIS T1	E3497	0.0174	5.5
MDI T1	E3479	0.0139	4
MDS T1	E3478	0.0134	7

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

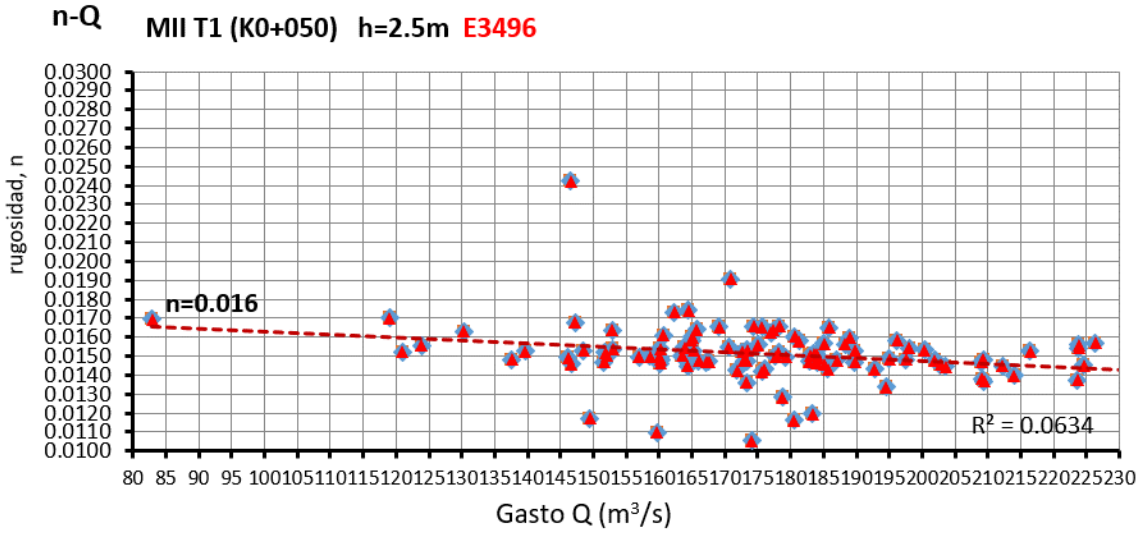


Figura 17. Rugosidad con respecto al gasto del *doppler* a 2.5 m (MII T1 en el K0+050); rugosidad representativa n = 0.016.

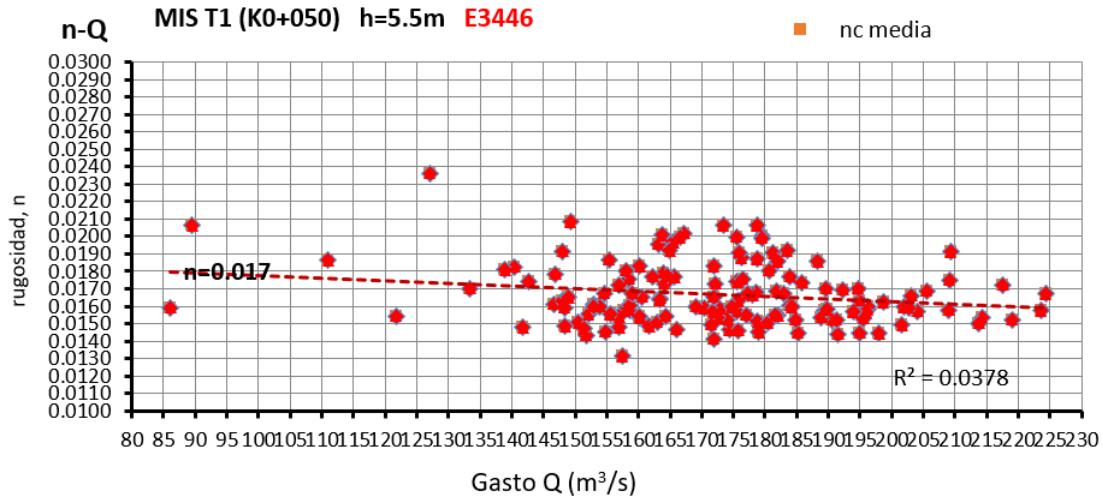


Figura 18. Rugosidad con respecto al gasto del *doppler* ubicado a 5.5 m (MIS T1 en el K0+050); rugosidad representativa n = 0.017.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

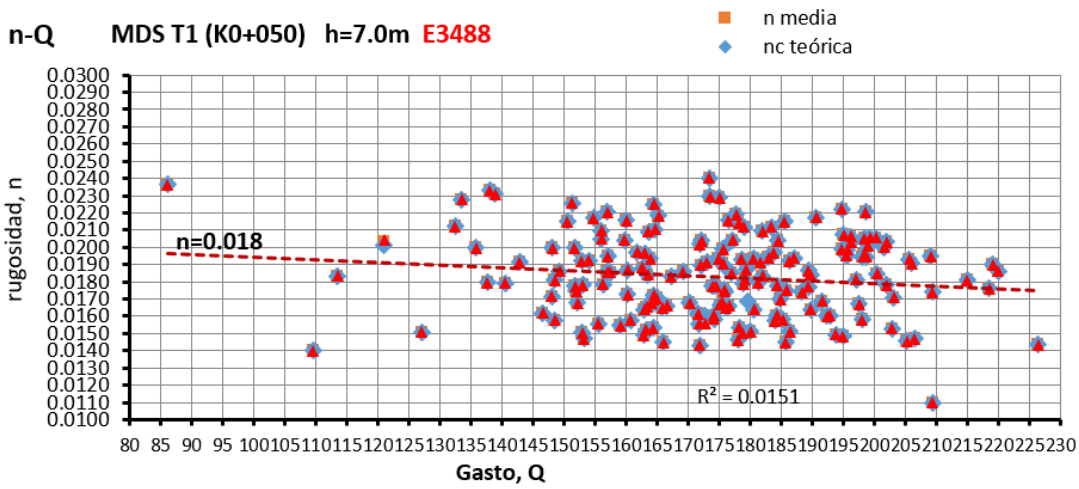
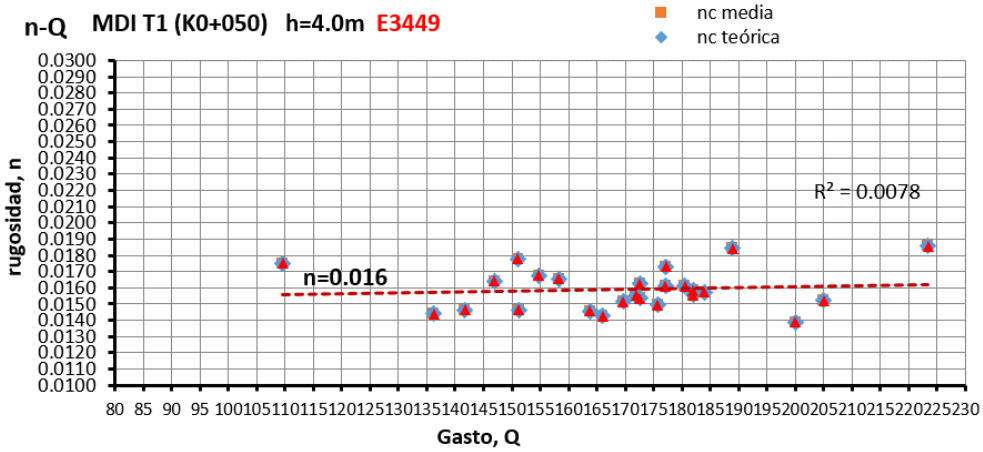


Figura 19. Rugosidad con respecto al gasto del *doppler* a 7 m (MDS T1 en el K0+050); rugosidad representativa n = 0.018.



Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 20. Rugosidad con respecto al gasto del *doppler* a 4 m (MDI T1 en el K0+050); rugosidad representativa n = 0.016.

Respecto al tirante, se observa que la rugosidad no cambia de forma significativa, como lo es con los gastos, aun cuando se incremente en 30 cm. La rugosidad representativa está en el rango de n = 0.019 (Figura 21, Figura 22 y Figura 23).

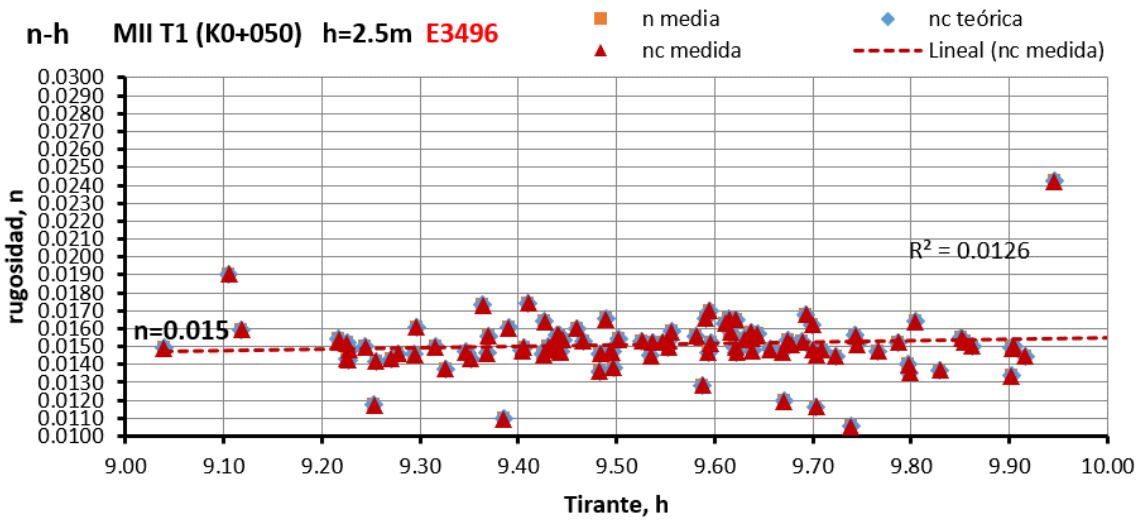


Figura 21. Rugosidad con respecto al tirante obtenida del *doppler* a 2.5 m (MII T1 en el K0+050); rugosidad representativa n = 0.015.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

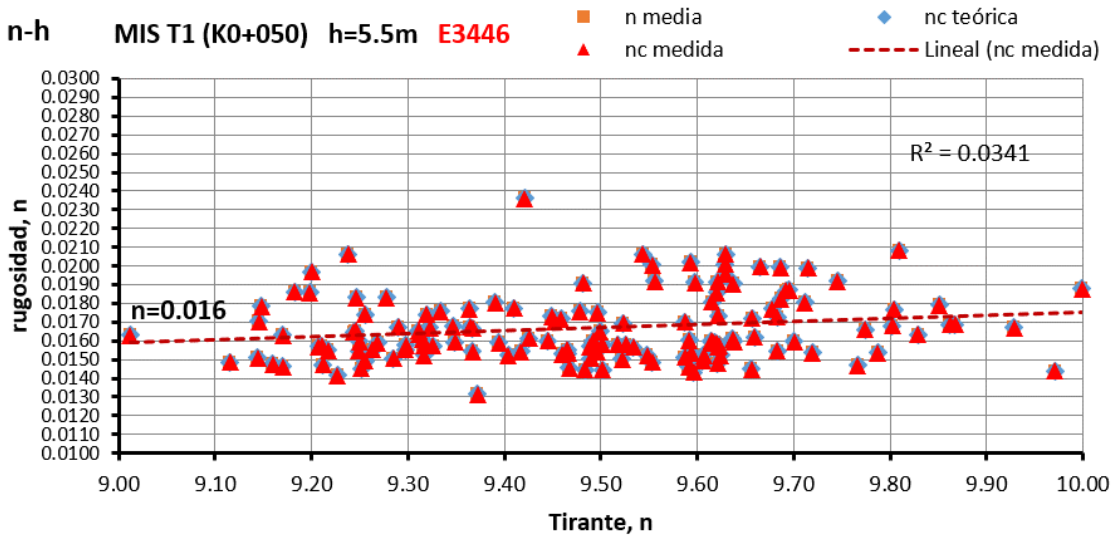
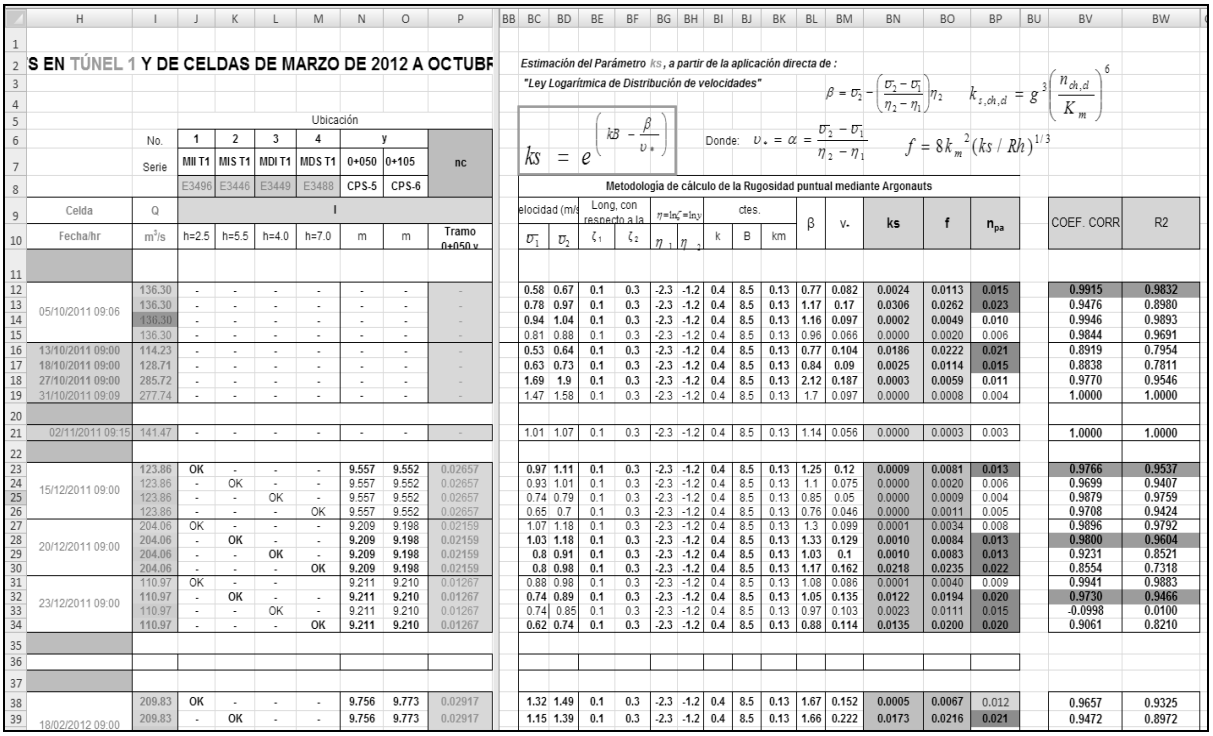


Figura 22. Rugosidad con respecto al tirante obtenida del *doppler* a 5.5 m (MIS T1 en el K0+050); rugosidad representativa n = 0.016.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



S EN TÚNEL 1 Y DE CELDAS DE MARZO DE 2012 A OCTUBF

Ubicación

No.	1	2	3	4	y		nc
Serie	MII T1	MIS T1	MDI T1	MDS T1	0+050	0+105	
	E3496	E3446	E3449	E3488	CPS-5	CPS-6	

Celda	Q	I					
Fecha/hr	m³/s	h=2.5	h=5.5	h=4.0	h=7.0	m	m	Tramo 0+050 y
	136.30	-	-	-	-	-	-	-
05/10/2011 09:06	136.30	-	-	-	-	-	-	-
	136.30	-	-	-	-	-	-	-
	136.30	-	-	-	-	-	-	-
13/10/2011 09:00	114.23	-	-	-	-	-	-	-
18/10/2011 09:00	128.71	-	-	-	-	-	-	-
27/10/2011 09:00	285.72	-	-	-	-	-	-	-
31/10/2011 09:09	277.74	-	-	-	-	-	-	-
02/11/2011 09:15	141.47	-	-	-	-	-	-	-
	123.86	OK	-	-	-	9.557	9.552	0.02657
15/12/2011 09:00	123.86	-	OK	-	-	9.557	9.552	0.02657
	123.86	-	-	OK	-	9.557	9.552	0.02657
	123.86	-	-	-	OK	9.557	9.552	0.02657
	204.06	OK	-	-	-	9.209	9.198	0.02159
20/12/2011 09:00	204.06	-	OK	-	-	9.209	9.198	0.02159
	204.06	-	-	OK	-	9.209	9.198	0.02159
	204.06	-	-	-	OK	9.209	9.198	0.02159
	110.97	OK	-	-	-	9.211	9.210	0.01267
23/12/2011 09:00	110.97	-	OK	-	-	9.211	9.210	0.01267
	110.97	-	-	OK	-	9.211	9.210	0.01267
	110.97	-	-	-	OK	9.211	9.210	0.01267
	209.83	OK	-	-	-	9.756	9.773	0.02917
18/02/2012 09:00	209.83	-	OK	-	-	9.756	9.773	0.02917

Estimación del Parámetro ks, a partir de la aplicación directa de :

"Ley Logaritmica de Distribución de velocidades"

$$\beta = v_2 - \left(\frac{v_2 - v_1}{\eta_2 - \eta_1}\right)\eta_2 \qquad k_{s,ch,cl} = g^3\left(\frac{n_{ch,cl}}{K_m}\right)^6$$

$$ks = e^{\left(kB - \frac{\beta}{v_*}\right)} \qquad \text{Donde: } v_* = \alpha = \frac{v_2 - v_1}{\eta_2 - \eta_1} \qquad f = 8k_m^{\,2}(ks/Rh)^{1/3}$$

Metodología de cálculo de la Rugosidad puntual mediante Argonauts

velocidad (m/s		Long. con respecto a la		$\eta=\ln\zeta=\ln y$		ctes.			β	v*	ks	f	n_{pa}	COEF. CORR	R2
v_1	v_2	ζ_1	ζ_2	η_1	η_2	k	B	km							
0.58	0.67	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	0.77	0.082	0.0024	0.0113	0.015	0.9915	0.9832
0.78	0.97	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.17	0.17	0.0306	0.0262	0.023	0.9476	0.8980
0.94	1.04	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.16	0.097	0.0002	0.0049	0.010	0.9946	0.9893
0.81	0.88	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	0.96	0.066	0.0000	0.0020	0.006	0.9844	0.9691
0.53	0.64	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	0.77	0.104	0.0186	0.0222	0.021	0.8919	0.7954
0.63	0.73	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	0.84	0.09	0.0025	0.0114	0.015	0.8838	0.7811
1.69	1.9	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	2.12	0.187	0.0003	0.0059	0.011	0.9770	0.9546
1.47	1.58	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.7	0.097	0.0000	0.0008	0.004	1.0000	1.0000
1.01	1.07	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.14	0.056	0.0000	0.0003	0.003	1.0000	1.0000
0.97	1.11	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.25	0.12	0.0009	0.0081	0.013	0.9766	0.9537
0.93	1.01	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.1	0.075	0.0000	0.0020	0.006	0.9699	0.9407
0.74	0.79	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	0.85	0.05	0.0000	0.0009	0.004	0.9879	0.9759
0.65	0.7	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	0.76	0.046	0.0000	0.0011	0.005	0.9708	0.9424
1.07	1.18	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.3	0.099	0.0001	0.0034	0.008	0.9896	0.9792
1.03	1.18	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.33	0.129	0.0010	0.0084	0.013	0.9800	0.9604
0.8	0.91	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.03	0.1	0.0010	0.0083	0.013	0.9231	0.8521
0.8	0.98	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.17	0.162	0.0218	0.0235	0.022	0.8554	0.7318
0.88	0.98	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.08	0.086	0.0001	0.0040	0.009	0.9941	0.9883
0.74	0.89	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.05	0.135	0.0122	0.0194	0.020	0.9730	0.9466
0.74	0.85	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	0.97	0.103	0.0023	0.0111	0.015	-0.0998	0.0100
0.62	0.74	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	0.88	0.114	0.0135	0.0200	0.020	0.9061	0.8210
1.32	1.49	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.67	0.152	0.0005	0.0067	0.012	0.9657	0.9325
1.15	1.39	0.1	0.3	-2.3	-1.2	0.4	8.5	0.13	1.66	0.222	0.0173	0.0216	0.021	0.9472	0.8972

Figura 23. Cálculo de la rugosidad equivalente *ks*, y los parámetros *f* y *n*.

Asimismo, se observa que la rugosidad varía ligeramente en las zonas de casquillo: K0+160 al K0+215 y del K0+380 al K0+435, estas zonas tienen revestimiento de concreto liso, pues están reforzadas estructuralmente (Figura 24).

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Sección		Celda	Cad.	Rugosidad
CASETA 1	1 2	CPS - 4 CPS - 5	0+007 0+050	Concreto Hidráulico Concreto Lanzado
	2 3	CPS - 5 CPS - 6	0+050 0+105	Concreto Lanzado Concreto Hidráulico
	3 4	CPS - 6 CPS - 7	0+105 0+160	Concreto Lanzado Concreto Hidráulico
	4 **5**	CPS - 7 CPS - 8	0+160 0+215	**Concreto Hidráulico (Casquillo)**
	5 6	CPS - 8 CPS - 9	0+215 0+270	Concreto Lanzado Concreto Hidráulico
	6 7	CPS - 9 CPS - 10	0+270 0+325	Concreto Lanzado
	7 8	CPS - 10 CPS - 11	0+325 0+380	Concreto Lanzado
	8 **9**	CPS - 11 CPS - 12	0+380 0+435	**Concreto Lanzado (Casquillo)**
	9 10	CPS - 12 CPS - 13	0+435 0+490	Concreto Lanzado Concreto Hidráulico
	10 11	CPS - 13 CPS - 14	0+490 0+545	Concreto Lanzado

Figura 24. Ubicación de zonas de rugosidad (concreto lanzado y concreto hidráulico).

Se muestran dos gráficas: gastos mayores a 150 m^3/s (Figura 25), y gastos menores a 150 m^3/s (Figura 26), donde se observan esos cambios en la rugosidad.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

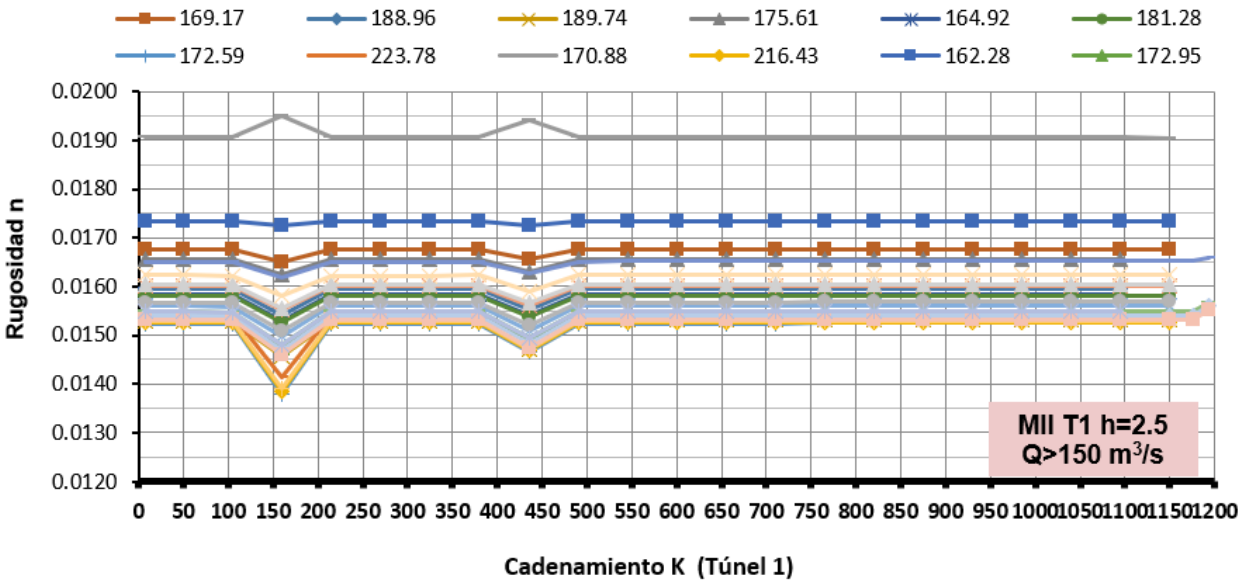


Figura 25. Rugosidad compuesta a lo largo del túnel para un $Q > 150$ m^3/s, para el *doppler* a 2.5 m de altura.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

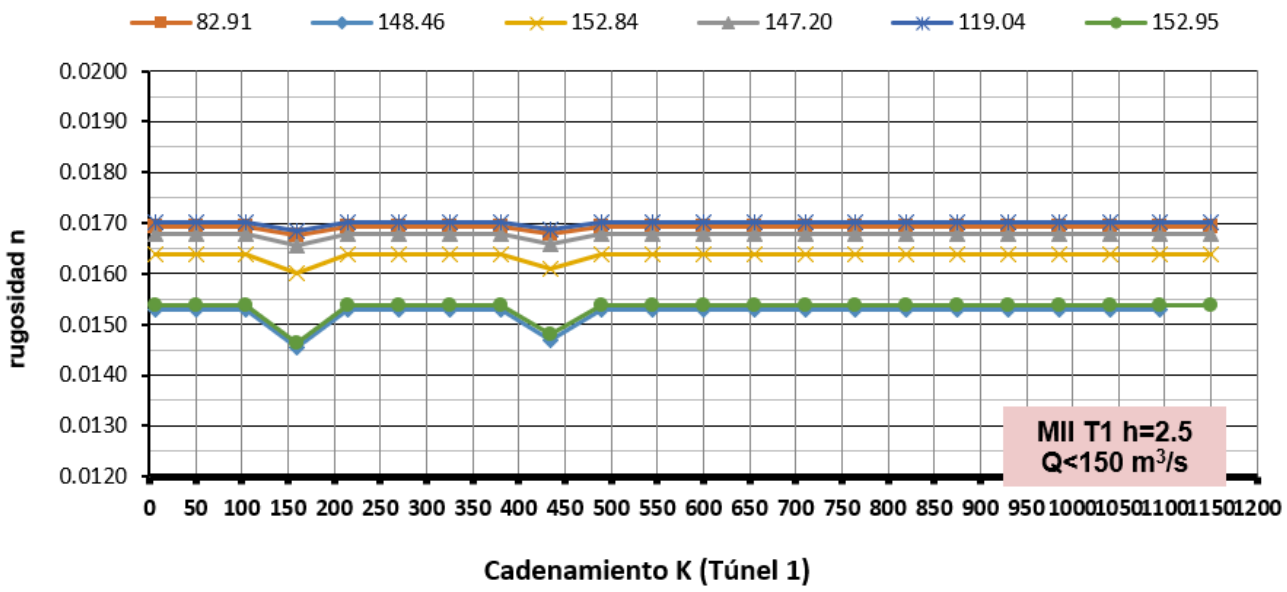


Figura 26. Rugosidad compuesta a lo largo del túnel para un $Q < 150$ m^3/s, para el *doppler* a 2.5 m de altura.

En la Figura 27 también se observa que el gasto entre secciones se mantiene muy parecido entre la primera y la última celda para los valores tomados cada hora, por lo que se puede realizar el cálculo como flujo permanente.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

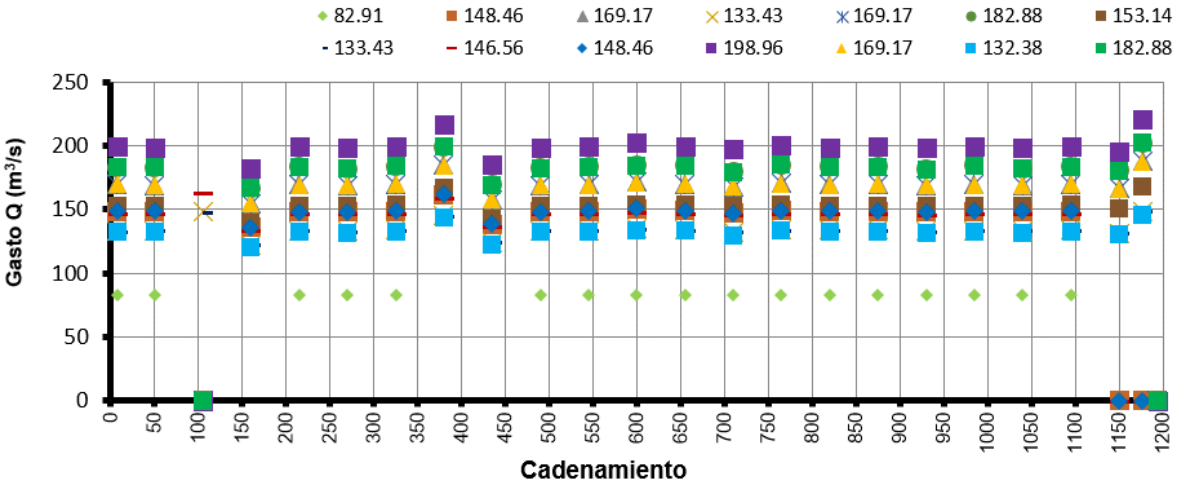


Figura 27. Gasto o caudal (por celda) a lo largo del túnel.

En la Figura 28, Figura 29, Figura 30 y Figura 31 se muestra el perfil hidráulico de algunos de los gastos modelados y calibrados; la línea azul representa el valor teórico, y los puntos negros representan los valores medidos.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

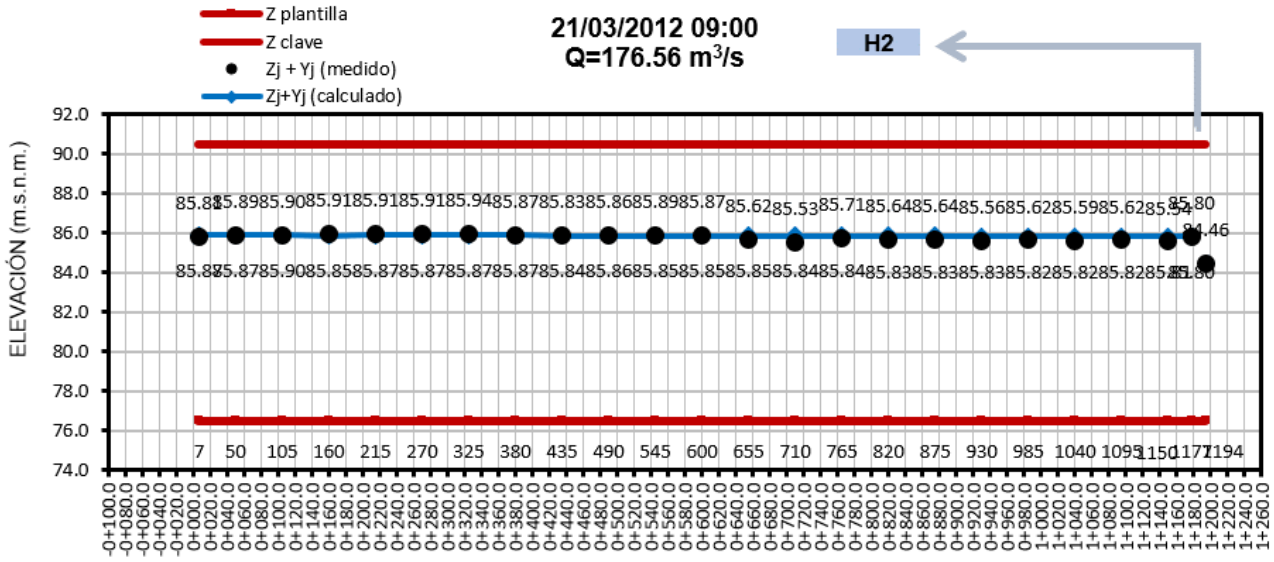
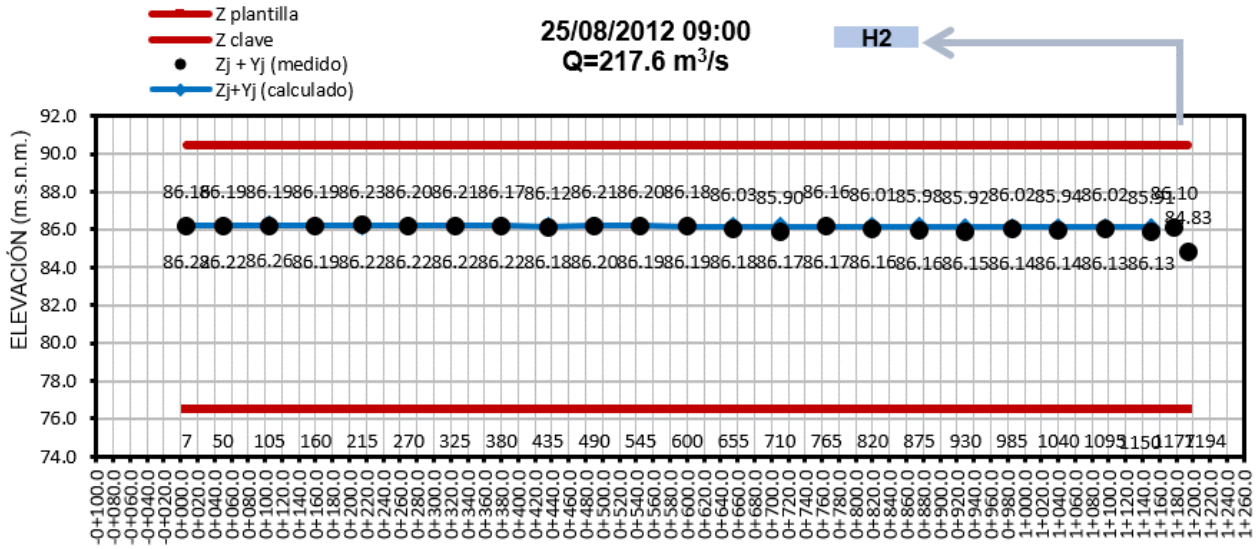


Figura 28. Calibración del modelo para un Q = 176.56 m^3/s.



Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 29. Calibración del modelo para un Q = 217.6 m^3/s.

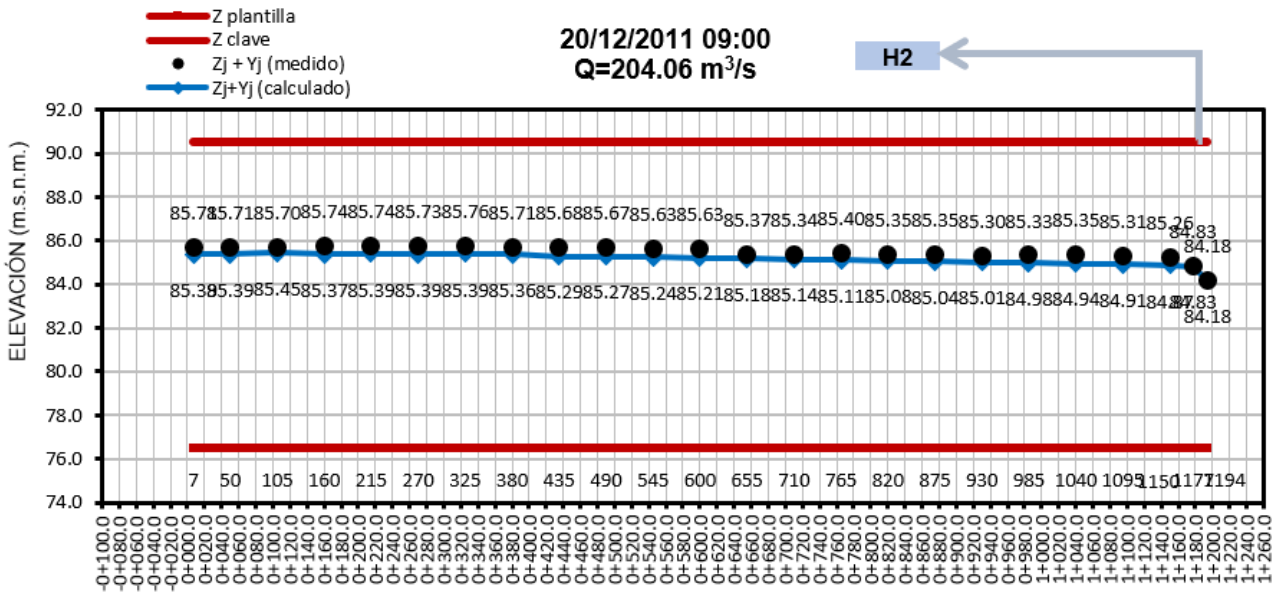


Figura 30. Calibración del modelo para un Q = 204.06 m^3/s.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

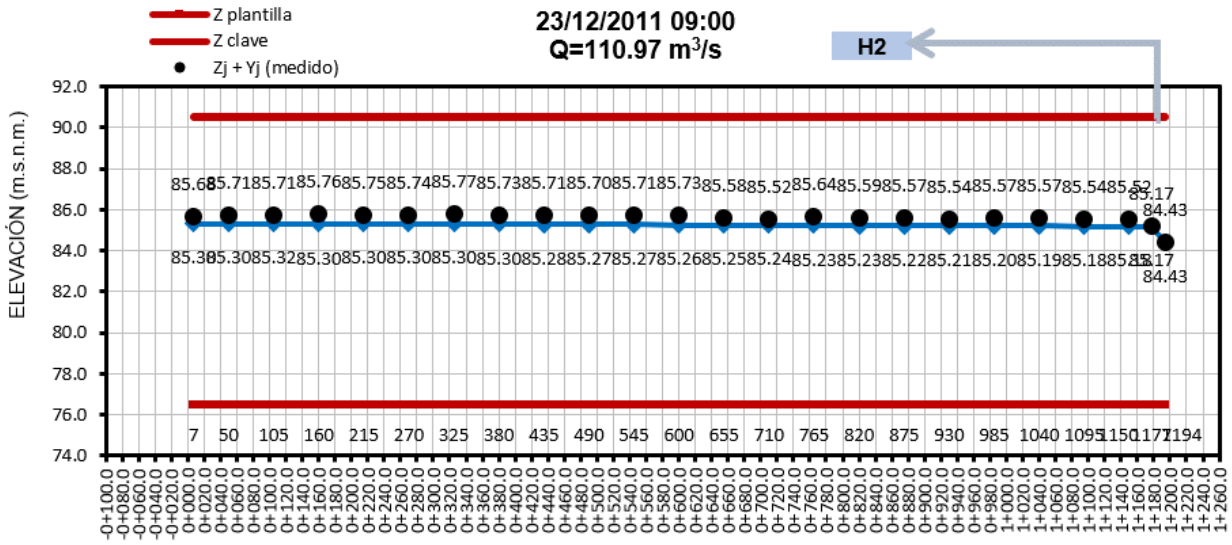


Figura 31. Calibración del modelo para un Q = 110.97 m^3/s.

Se revisó cada uno de los tres valores de rugosidad compuesta calibrados: $n_{c\text{-}EHG}$, Ecuación (12); $n_{c\text{-}medida}$, Ecuación (22); $n_{c\text{-}teórica}$, ecuaciones de la Tabla 3, identificando el mínimo error cuadrado, MEC, y para todos los cadenamientos con celda de medición de nivel. Se discretizaron e identificaron aquellos en los que se tuviera el menor valor de desviación estándar.

En los cadenamientos a lo largo del túnel se identificaron diversos valores de rugosidad. Después de discretizarlos y calibrarlos con respecto a las mediciones y al cálculo planteado con la ecuación hidráulica general, se encontraron los valores que se muestran en la Figura 32 con el mínimo

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

error cuadrático por cadenamiento, que equivalen a una rugosidad compuesta media para el túnel 1 de **0.0178**.

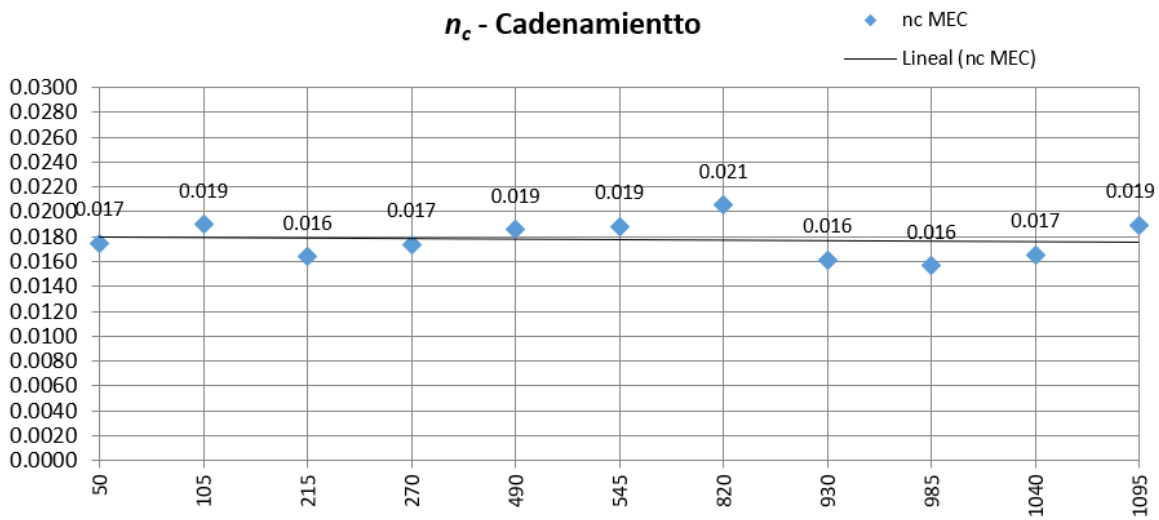


Figura 32. Rugosidad compuesta a partir del MEC por cadenamiento.

En la Figura 33 se muestra la tendencia de los valores de rugosidad compuesta obtenida para un rango de gastos de 130 a 210 m^3/s, y que fueron discretizados y calibrados a partir del modelo teórico y la metodología planteada para las 17 ecuaciones, así como las mediciones.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

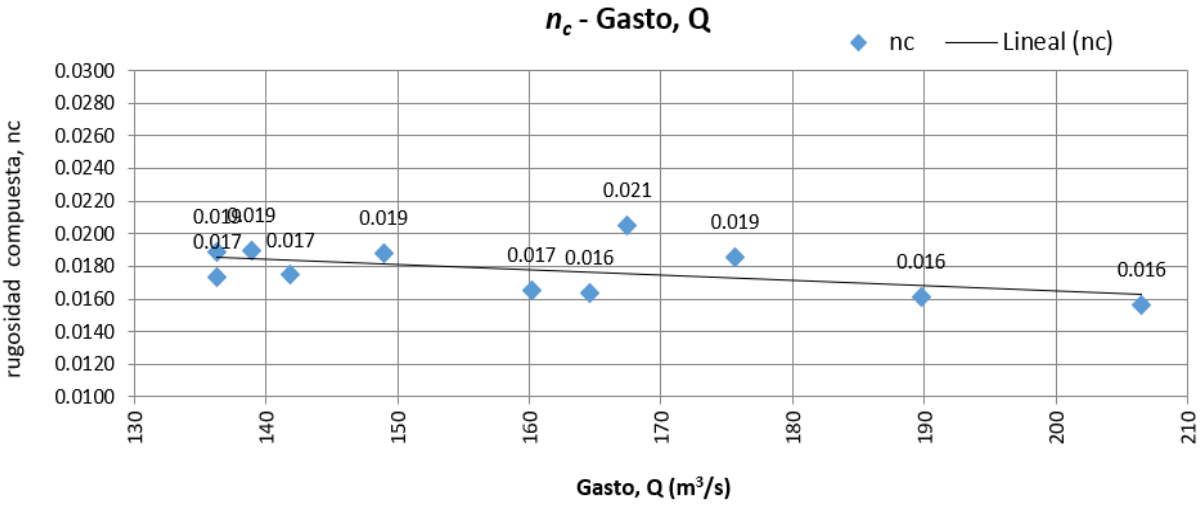


Figura 33. Rugosidad compuesta (n_c) con respecto al gasto medido (Q).

Se identificó que la ecuación de mayor ajuste de las 17 conocidas (Tabla 3) es la que se identifica con la letra "I" para un rango de gastos que van desde 85 hasta 285 m^3/s:

Ecuación I (15) (Chie-Yen, 2002):

$$I = n_c = \left[\frac{R^{1/3}}{P}\sum\frac{n_i^2 P_i}{R_i^{1/3}}\right]^{1/2} \quad (25)$$

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En la Figura 34 se muestran las ecuaciones de rugosidad compuesta n_c de mejor ajuste para cada gasto.

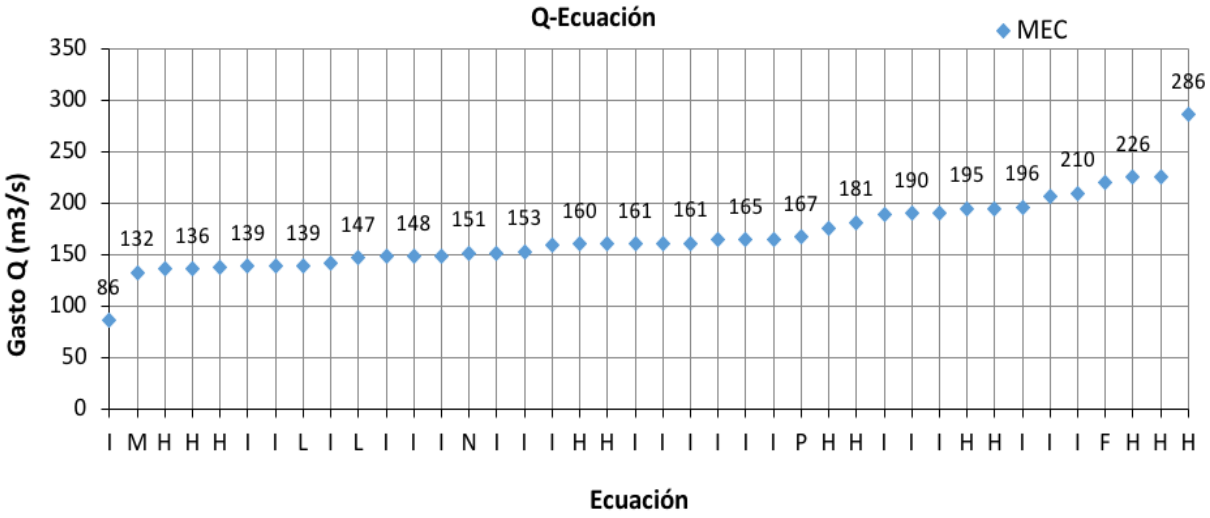


Figura 34. Ecuaciones de mejor ajuste para cada gasto calibrado.

Asimismo, se identifica que la integración de las metodologías expuestas permiten definir de mejor manera el parámetro de rugosidad compuesta además de las ecuaciones empíricas (Chie-Yen, 2002). Mediante la instrumentación hidráulica se pueden medir las velocidades en las zonas cercanas a la pared y que, complementados con mediciones de presión y caudal, permiten obtener el parámetro puntual de rugosidad equivalente integrando la ley logarítmica de velocidades, y las ecuaciones de Nikuradse y de Prandtl-Von Kármán para finalmente obtener la

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

rugosidad compuesta representativa de la sección o del túnel. Esta metodología se puede aplicar a canales anchos con condiciones de régimen hidráulicamente rugoso y permanente, donde es posible integrar la relación Darcy-Weisbach y Manning (Aldama & Ocón, 2012).

Se han realizado estudios previos experimentales para determinar la rugosidad compuesta en túneles en modelos en prototipo (Marengo & Arreguín, 2008). En 2007 se llevó a cabo una investigación experimental, donde se comparó el flujo con cuatro modelos de túneles en sección baúl funcionando como canal con diferentes rugosidades y bajo diversas condiciones de escurrimiento. El prototipo estudió cuatro rugosidades asociadas: acrílico, lija, plástico y carpeta, que se asemejan al concreto hidráulico, concreto lanzado y roca en prototipo. De los resultados experimentales se obtuvieron las siguientes aproximaciones: 1) para la combinación acrílico-lija se obtuvo una mejor aproximación con la ecuación M de Ida-Engelund; 2) para la combinación acrílico-plástico, la ecuación de mejor ajuste fue la F de Felkel; 3) en la combinación acrílico-tapete, el mejor ajuste fue la F de Felkel. Finalmente el autor recomendó que debido a la turbulencia que ocurre en la realidad se empleen las ecuaciones de Felkel (Ecuación F), la Ecuación de Yen (Ecuación H) y la Ecuación N de Yen también (ver Tabla 3).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Conclusiones

El planteamiento de la metodología desarrollada permite estudiar la rugosidad compuesta a través de la relación que existe entre la superficie de contacto y el fluido (zona de capa límite); aplicar las teorías de capa límite de Prandtl-Von Kármán utilizando los perfiles de velocidad obtenidos de instrumentación hidráulica, con mediciones muy cercanas a la pared para el caso de estudio del túnel 1 de comunicación del río Grijalva. Los resultados obtenidos de la rugosidad equivalente de Nikuradse *ks*, y con la relación entre la ecuación de Darcy-Weisbach y de Manning se obtuvo una rugosidad de pared. Finalmente, con el modelo hidráulico general y las mediciones por sección se obtuvo una rugosidad representativa del túnel de n = 0.0178. Se observó que a lo largo del túnel se mantiene el valor de rugosidad constante a excepción de los sitios donde se tiene cambio de revestimiento a concreto liso. También se encontró que la Ecuación I de Yen (Chie-Yen, 2002) es la que da mejor aproximación. Aun cuando la rugosidad compuesta no tenía una variación significativa en el rango de los gastos analizados (de 117 a 575 m^3/s), es recomendable dar continuación a la medición y aplicar la metodología para gastos mayores, pues las variaciones en la rugosidad solo podrían observarse si el gasto aumentara de manera significativa. También se

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-04

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

recomienda continuar con los registros de presión, gasto y velocidad para llevar a cabo la calibración con datos medidos.

La implementación de la instrumentación hidráulica en condiciones reales en obras de desvío es una herramienta importante de investigación para el estudio de la rugosidad compuesta para el diseño de estas obras, y mejorar así los métodos empíricos existentes. Estudios previos sobre estos temas se han realizado en modelos en prototipo, sin embargo, ello integra adicionalmente un parámetro de desviación por la escala.

El uso de la rugosidad compuesta, es decir, rugosidad combinada de concreto liso y concreto lanzado en los túneles permite asegurar un funcionamiento hidráulico más eficiente en las obras de desvío, garantizando una mejor capacidad de descarga hidráulica ante una contingencia durante la construcción de una presa, ya que permite integrar un mayor periodo de retorno (*Tr*), al igual que mantener una mejor relación de beneficio/costo al no tener que revestir totalmente con concreto hidráulico todas las secciones.

De acuerdo con Marengo (2019), en los últimos años se ha prestado gran importancia a las condiciones de durabilidad y falla en las presas y sus obras temporales, como las de desvío. Se requiere revisar desde el punto de vista del marco técnico, social y legal. De igual forma, es necesario el desarrollo de métodos numéricos y técnicas computacionales que permitan tener un mejor conocimiento y entendimiento de los aspectos hidrológicos, geológicos y de los materiales, entre otros, por lo

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

que se requieren serios esfuerzos en la implementación de instrumentación, así como definir de mejor manera el comportamiento estructural de las presas.

La consideración de la evaluación de los riesgos de falla de este tipo de obras en conjunto con los métodos de análisis de rugosidad compuesta aplicados en esta investigación permitirían aportar mejores elementos para el diseño de nuevos proyectos.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y a los compañeros de instrumentación en laboratorio y campo. A la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos de la CFE por la oportunidad de colaborar dirigiendo diversos proyectos y estudios de instrumentación en obras hidráulicas. Al doctor Humberto Marengo como coordinador de Proyectos Hidroeléctricos y promotor de este tema. Al doctor Álvaro Aldama, quien asesoró éste y diversos proyectos en relación con los conceptos fundamentales de la mecánica de fluidos, que abrieron camino a esta investigación.

Referencias

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Aldama, A. A., & Ocón, A. R. (enero-marzo, 2002). Resistencia al flujo en canales y límites de aplicabilidad de la fórmula Manning. *Ingeniería Hidráulica en México*, 17(1), 107-115.

Chie-Yen, B. F. (January 2002). Open Channel Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(20).

Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Tokyo, Japón: McGraw Hill Kogakusha, LTD.

Marengo, H. (2019). *Obras de desvío en proyectos hidráulicos, aspectos de diseño y construcción*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Marengo, H. (2011). *Deslizamiento de tierra y roca que obstruyó el río Grijalva y su solución con túneles*. Conferencia CFE. Tercer Seminario de Potamología, IMTA, Jiutepec, Morelos, México.

Marengo, H., & Arreguín, F. (enero-marzo, 2008). Análisis hidráulico experimental en túneles de conducción en sección baúl trabajando como canal, considerando rugosidades compuestas. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23(1), 21-44.

Rouse, H. (1965). Critical analysis of open channel resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, HY 4(91), 1-25.

Schlichting, H. (1979). *Boundary-layer theory* (7th ed.). New York, USA: McGraw-Hill.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Sotelo, A. G. (2002). *Hidráulica de canales*. México, DF, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.